



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para un sistema de localización basado en tecnología LoRa

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autores :

Braulio Vinicio Arpi Saquipay C.I. 0104418587

Christian Paúl Sánchez Venenaula C.I. 0105736748

Director :

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD C.I. 0301496840

Co-Director :

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD C.I. 0103907036

Cuenca - Ecuador

26/04/2019



Resumen

Durante los últimos años ha habido una demanda creciente de servicios y sistemas que dependen de la ubicación específica de personas y diferentes tipos de objetos. Por esta razón, existe un interés en el desarrollo y la evolución de los sistemas de posicionamiento (PSs) que utilizan las redes inalámbricas de sensores (WSNs) para servicios de localización complejos. El objetivo principal de estos PSs es estimar la posición relativa relacionada con otras posiciones conocidas dentro de un sistema de coordenadas. Actualmente, el sistema de posicionamiento global (GPS) ofrece una buena exactitud en los servicios de localización alrededor del mundo. Aunque no funciona efectivamente en aplicaciones con una gran cantidad de dispositivos pequeños, baratos y de bajo consumo de energía. Por lo tanto, los investigadores actuales prefieren trabajar en nuevas tecnologías inalámbricas de bajo costo; por ejemplo, WiFi, Zigbee, o LoRa. En este contexto, es muy importante conocer algunos aspectos fundamentales antes de comenzar a diseñar un PS. Por ejemplo; la arquitectura de los PSs, fuentes de error; algoritmos de posicionamiento comunes, como ToA, TDoA, AoA y RSSI; y algoritmos de localización comunes, como multilateración, triangulación y trilateración. Además, es importante conocer las necesidades y limitaciones de los algoritmos de posicionamiento y localización sobre características RF. El objetivo principal es verificar la fiabilidad de determinados dispositivos disponibles para diseñar e implementar el PS.

Para concluir, este trabajo de titulación tiene el objetivo principal de diseñar e implementar un PS de bajo costo basado en el algoritmo de posicionamiento RSSI y localización trilateración. Para analizar el comportamiento y la factibilidad de los dispositivos FiPy y LoPy con tecnología LoRa en aplicaciones de localización. Además, el trabajo evalúa un conjunto de pruebas para encontrar comportamientos irregulares y mitigar estos problemas. Como resultado final proporcionar un PS que funcione correctamente; y un análisis comparativo sobre el error de exactitud entre diferentes escenarios y estudios similares.

Palabras claves : LoRa. PS. RF. RSSI. TDoA. ToA. WSN.



Abstract

Along the last years, we have seen a growing demand of services and systems that depend on the specific location of both people and different kinds of gadgets. For this reason, there is an interest on the development and evolution of Positioning Systems (PS) that use the Wireless Sensor Networks (WSN) to complex location services. The main aim of these PS is to estimate the relative position related to other known positions inside of a coordinate system. Currently, the Global Positioning System (GPS) offers good accuracy on location services around the world. Although it does not work effectively on applications with a high amount of small, cheap and low power requirements devices. Therefore, current researchers prefer to work on new low-cost wireless technologies; for example, WiFi, Zigbee, or LoRa. In this context, it is very important to know some fundamental aspects before of start to design a PS. For example; the architecture of the PS, sources of error; common positioning algorithms, such as ToA, TDoA, AoA, and RSSI; and common location algorithms, such as multilateration, triangulation, and trilateration. Besides, it is important to know the needs and limitations of both positioning and localization algorithms about RF features. The main purpose is to verify the feasibility of determined devices available to design and implement the PS.

To conclude, this thesis project has the main aim to design and implement a low-cost PS based on RSSI positioning algorithm and trilateration location algorithm. To analyze the behavior and feasibility of both FiPy and LoPy devices with LoRa technology in location applications. Besides, the thesis evaluates a set of tests to find irregular behaviors and to mitigate these problems. As a final result provide a PS working correctly; and a comparative analysis about the accuracy error among different scenarios and similar studies.

Keywords : LoRa. PS. RF. RSSI. TDoA. ToA. WSN.





Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
Cláusulas	XIX
Dedicatoria	XXIV
Dedicatoria	XXV
Agradecimientos	XXVI
Abreviaciones y acrónimos	XXVII
1. Introducción	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	4
2. Marco teórico	5
2.1. Introducción	5
2.2. Clasificación de los sistemas de posicionamiento	5
2.3. Técnicas de estimación de la posición	6



2.3.1.	Tiempo de llegada (ToA)	6
2.3.1.1.	Algoritmos de estimación de la ubicación para ToA	7
2.3.2.	Diferencia de tiempo de llegada (TDoA)	8
2.3.2.1.	Algoritmos de estimación de la ubicación para TDoA	8
2.3.3.	Ángulo de llegada (AoA)	9
2.3.4.	Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)	10
2.4.	Algoritmos de localización	11
2.4.1.	Triangulación	11
2.4.2.	Trilateración	11
2.4.3.	Multilateración	11
2.5.	Modelo de pérdida por trayectoria (PLM)	12
2.6.	Sistemas de posicionamiento (PSs)	13
2.6.1.	Sistema global de navegación por satélite (GNSS)	13
2.6.1.1.	Sistema de posicionamiento global (GPS)	13
2.6.2.	Técnicas de radiolocalización	14
2.6.3.	Fuentes de error en sistemas de localización	15
2.6.3.1.	Propagación multitrayectoria	15
2.6.3.2.	Propagación sin línea de vista	15
2.6.3.3.	Interferencia de acceso múltiple (MAI)	15
2.6.4.	Estimación de la posición	16
2.6.4.1.	Mediciones de dos vías	16
2.6.4.2.	Mediciones de una vía	17
2.7.	Red de área amplia de baja potencia (LPWAN)	17
2.8.	Tecnología LoRa	18
2.8.1.	Espectro ensanchado (SS)	18
2.8.2.	Espectro ensanchado chirp (CSS)	19
2.8.3.	Modulación LoRa	20
2.8.3.1.	Características	20
2.8.4.	Red de área amplia de largo alcance (LoRaWAN)	21
2.8.4.1.	Clases de LoRaWAN	21
2.8.4.2.	Activación del dispositivo final	22
3.	Estado del arte	24
3.1.	Introducción	24
3.2.	Sistemas de posicionamiento de gama alta	25
3.3.	Sistemas de posicionamiento de gama baja	26
3.4.	Conclusiones	31
4.	Diseño e implementación de un sistema de posicionamiento basado en tecnología LoRa	32



4.1.	Introducción	32
4.2.	Diseño del sistema de posicionamiento	33
4.2.1.	Requerimientos del sistema de posicionamiento	33
4.2.2.	Descripción y disposición de dispositivos LoRa	33
4.2.2.1.	Descripción de los equipos LoRa	33
4.2.2.2.	Módulos de control del sistema de posicionamiento	34
4.2.2.3.	Características de los dispositivos FiPy y LoPy	34
4.2.2.4.	Disposición de dispositivos FiPy o LoPy	38
4.2.3.	Selección de algoritmos de posicionamiento y localización	41
4.2.3.1.	Algoritmos de posicionamiento	41
4.2.3.2.	Algoritmos de localización	42
4.2.4.	Fuentes de incertidumbre en el sistema de posicionamiento	42
4.2.5.	Escenarios de evaluación	42
4.2.5.1.	Descripción de los escenarios	42
4.2.5.2.	Evaluación del comportamiento RSSI en distintos escenarios	44
4.3.	Arquitectura del sistema de posicionamiento	46
4.3.1.	Descripción de la arquitectura general	46
4.3.1.1.	Arquitectura de los nodos ancla	46
4.3.1.2.	Arquitectura de nodo objetivo	47
4.3.1.3.	Arquitectura del procesador de datos	47
4.3.2.	Subsistemas del sistema de posicionamiento	47
4.3.3.	Comunicaciones en el sistema de posicionamiento	47
4.3.3.1.	Enlace de comunicación entre el nodo objetivo y los nodos ancla	48
4.3.3.2.	Enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador	49
4.4.	Implementación del sistema de posicionamiento	50
4.4.1.	Configuración del nodo objetivo y los nodos ancla	50
4.4.1.1.	Configuración del nodo objetivo	51
4.4.1.2.	Configuración del nodo ancla	51
4.4.1.3.	Modelamiento del escenario	51
4.4.2.	Funcionamiento del sistema de posicionamiento	52
4.5.	Conclusiones	56
5.	Resultados y discusiones	58
5.1.	Introducción	58
5.2.	Análisis preliminar	59
5.2.1.	Primera campaña de medición	59
5.2.2.	Segunda campaña de medición	61
5.2.2.1.	Prueba 1	62
5.2.2.2.	Prueba 2	63
5.2.2.3.	Prueba 3	63



5.2.2.4.	Prueba 4	63
5.2.3.	Consideraciones para la tercera campaña de medición	64
5.2.3.1.	Nuevo enfoque de caracterización	64
5.2.3.2.	Tres nuevos enfoques de uso de la variable RSSI	64
5.2.3.3.	Filtro de factores que introducen error	64
5.2.4.	Tercera campaña de medición	65
5.2.4.1.	Evaluación de los modelos de pérdida por trayectoria	65
5.2.4.2.	Análisis de confiabilidad de los modelos de pérdida por trayectoria	68
5.2.4.3.	Pruebas 1 y 2	72
5.2.4.4.	Pruebas 3 y 4	73
5.2.4.5.	Pruebas 5 y 6	74
5.3.	Resultados del sistema de posicionamiento	74
5.3.1.	Escenarios simétricos	75
5.3.2.	Escenarios no simétricos	76
5.3.2.1.	Escenario 4	76
5.3.2.2.	Escenario 5	77
5.4.	Análisis de resultados	79
5.4.1.	Análisis campañas de medición	79
5.4.2.	Análisis trabajos similares	81
5.4.2.1.	Comparación 1	81
5.4.2.2.	Comparación 2	83
5.4.2.3.	Comparación 3	83
5.4.3.	Análisis eficiencia del sistema de posicionamiento	84
5.4.4.	Fiabilidad del sistema de posicionamiento	84
5.5.	Conclusiones	85
6.	Conclusiones y recomendaciones	86
6.1.	Conclusiones	86
6.2.	Recomendaciones	88
6.3.	Trabajos futuros	88
A.	Algoritmos de localización	92
A.1.	Algoritmo de localización trilateración	92
A.1.0.1.	Demostración para 3 nodos ancla	92
A.1.0.2.	Demostración para 4 nodos ancla	93
A.1.0.3.	Demostración para n nodos ancla	94
A.2.	Evaluación del algoritmo trilateración	95
A.3.	Código del algoritmo trilateración	95
B.	Bandas ISM en Ecuador	97



B.1. Atribución de frecuencias en Ecuador	97
C. Características hardware del sistema de posicionamiento	98
C.1. FiPy y LoPy 1.0	98
C.1.1. Chip Semtech <i>SX1272</i>	100
C.2. LoPy 4.0	100
C.2.1. Chip Semtech <i>SX1276</i>	100
D. Configuración de los dispositivos del sistema de posicionamiento	103
D.1. Diseño del módulo de control	103
D.1.1. Consideraciones de diseño	103
D.1.1.1. Nodo objetivo	104
D.1.1.2. Nodo ancla	104
D.1.2. Diseño esquemático	104
D.1.3. Diseño PCB	105
D.2. Funcionamiento del PCB de control	107
D.2.1. Modo nodo objetivo	107
D.2.2. Modo nodo ancla	111
E. Evaluación variabilidad en la potencia de transmisión	113
E.1. Variabilidad en la potencia de transmisión	113
F. Paquetes LoRa	119
F.1. Estructura de los paquetes LoRa	119
F.1.1. Modo de encabezado explícito	120
F.1.2. Modo de encabezado implícito	120
F.1.3. Baja tasa de datos optimizada	120
F.2. Tiempo en aire	120
F.3. Herramienta para cálculos teóricos de chips LoRa de <i>Semtech</i>	121
F.3.1. Prueba con la configuración LoRa del PS	121
Bibliografía	124





Índice de figuras

1.1. Sistema de localización inalámbrico [1].	2
2.1. Clasificación de un PS [2].	6
2.2. Operación de las estimaciones ToA y RSSI [2].	7
2.3. Operación de la estimación TDoA [2].	8
2.4. Comparación entre las estimaciones ToA y TDoA [2].	9
2.5. Operación de la estimación AoA [2].	10
2.6. LBS para un amplio rango de redes inalámbricas [3, 4].	14
2.7. Propagación de señales en un escenario NLoS [5].	16
2.8. Un PS esférico [2].	17
2.9. Proceso de modulación [6].	19
2.10. Proceso de demodulación [6].	19
2.11. Clases de LoRaWAN [7].	22
4.1. Diagrama de bloques de la placa del circuito impreso de control.	36
4.2. Escenarios de evaluación para las distancias cercana, mediana y lejana.	38
4.3. Resultados de evaluar los tres enfoques de medición del RTT a BW= 500 kHz, SF = 12 y $P_{TX} = 20$ dBm.	39
4.4. Disposición de los equipos para pruebas del rango dinámico de la variable RSSI.	39
4.5. Pruebas controladas en campo con atenuador variable de enlace entre transmisor 7fee y receptor 6d08.	40
4.6. Disposición de dispositivos FiPy o LoPy.	41
4.7. Escenarios de evaluación para las distancias cercana, mediana y lejana.	44
4.8. Pruebas de comportamiento en escenarios urbano y rural a BW = 500 kHz, SF = 12 y $P_{TX} = 5$ dBm.	45
4.9. Arquitectura general del sistema de posicionamiento.	46
4.10. Estructura de una trama de capa 2 LoRa, Apéndice F [8, 9].	49
4.11. Secuencia de mensajes del enlace de comunicación entre nodo objetivo y ancla.	49



4.12. Secuencia de mensajes del enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador.	50
4.13. Escenario rural de 4 nodos ancla con LoS.	52
4.14. Adquisiciones RSSI con el método <i>round-robin scheduling</i>	53
4.15. Datos almacenados en el dispositivo LoPy.	54
4.16. Visualización de las mediciones RSSI y SNR mediante el protocolo <i>Telnet</i> y un interfaz REPL.	54
4.17. Proceso de extracción de archivos entre el nodo objetivo y la computadora.	55
4.18. Datos extraídos satisfactoriamente a la memoria de la computadora.	55
4.19. Visualización de la posición estimada.	56
5.1. Caracterización de la primera campaña de medición a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.	60
5.2. Caracterización de la segunda campaña de medición a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.	62
5.3. Caracterización de la tercera campaña de medición, escenario de dimensión $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.	66
5.4. Evaluación de los PLMs, de un escenario de dimensión $90\text{ m} \times 90\text{ m}$	67
5.5. Puntos de prueba para cada uno de los escenarios de medición.	69
5.6. Simulación del funcionamiento del PS.	70
5.7. Error promedio de los puntos de simulación.	71
5.8. Interfaz gráfica del PS para escenarios simétricos.	75
5.9. Conjunto de posibles estimaciones.	76
5.10. Interfaz de bienvenida del PS.	77
5.11. Interfaz gráfica del PS para los escenarios no simétricos.	78
5.12. Conjunto de posibles estimaciones para los escenarios no simétricos.	79
5.13. Error de estimación de las pruebas de las campañas de medición.	80
5.14. Comparación errores de simulación versus mediciones reales.	82
A.1. Evaluación del error de estimación introducido en el algoritmo trilateración por el PLM.	95
C.1. FiPy y LoPy en sus versiones 1.0 y 4.0 [10–12].	98
C.2. Diagrama de bloques FiPy [10].	99
C.3. Diagrama de bloques LoPy 1.0 [11].	99
C.4. Diagrama de bloques LoPy 4.0 [12].	101
D.1. Diseño esquemático del PCB de control del nodo ancla.	105
D.2. PCB de control final del nodo ancla.	106
D.3. Diagrama de funcionamiento del nodo ancla y del nodo objetivo.	107



E.1. Equipo FiPy con identificador $f1e0$ a $BW=500$ kHz, $SF=12$ y $P_{TX}=5$ dBm. .	115
E.2. Equipo FiPy con identificador $ee00$ a $BW=500$ kHz, $SF=12$ y $P_{TX}=20$ dBm. .	116
E.3. Equipo LoPy 1.0 con identificador $7fec$ a $BW=500$ kHz, $SF=12$ y $P_{TX}=20$ dBm.	117
E.4. Equipo LoPy 1.0 con identificador $6e30$ a $BW=500$ kHz, $SF=12$ y $P_{TX}=5$ dBm.	118
F.1. Estructura del paquete LoRa [8, 9].	119
F.2. Calculadora para chips LoRa.	123





Índice de tablas

2.1. Comparación entre métodos de estimación de la posición.	11
3.1. Ventajas y desventajas de los PS de gama alta.	27
3.2. Ventajas y desventajas de los PS de gama baja.	30
4.1. Requerimientos del sistema de posicionamiento, Secciones 2.6.3, 2.3, 2.4 y Apéndice B.	34
4.2. Características relevantes de dispositivos FiPy y LoPy, Apéndice C.	35
4.3. Sensibilidad RSSI de los dispositivos FiPy y LoPy, Apéndice C.	35
4.4. Consideraciones de diseño del PCB control.	37
4.5. Descripción de las fuentes de incertidumbre.	43
4.6. Descripción de los escenarios.	43
4.7. Subsistemas del sistema de posicionamiento.	48
4.8. Parámetros de modulación LoRa.	48
4.9. Promediado espacial [13, 14].	52
5.1. Descripción de los escenarios de prueba del PS.	59
5.2. Identificación de los dispositivos LoRa en la primera campaña de medición.	60
5.3. Puntos reales de la primera campaña de medición.	60
5.4. Errores de estimación de la primera y segunda campaña de medición.	61
5.5. Identificación de los dispositivos LoRa en la segunda campaña de medición.	61
5.6. Pruebas de la segunda campaña de medición.	61
5.7. Conjunto de posibles estimaciones.	62
5.8. Identificación de los dispositivos LoRa en la tercera campaña de medición.	65
5.9. Pruebas de la tercera campaña de medición.	65
5.10. Puntos para el escenario con dimensión de 60 m×60 m.	68
5.11. Puntos para el escenario con dimensión de 90 m×90 m.	68
5.12. Puntos para el escenario con dimensión de 150 m×150 m.	68
5.13. Puntos para el escenario con dimensión 200 m×200 m.	69
5.14. Error promedio de simulación para cada escenario.	72



5.15. Error de estimación de la prueba 1 de la tercera campaña de medición.	72
5.16. Error de estimación de la prueba 2 de la tercera campaña de medición.	73
5.17. Error de estimación de la prueba 3 de la tercera campaña de medición.	73
5.18. Error de estimación de la prueba 4 de la tercera campaña de medición.	73
5.19. Error de estimación de la prueba 5 de la tercera campaña de medición.	74
5.20. Error de estimación de la prueba 6 de la tercera campaña de medición.	74
5.21. Error de estimación para los Escenarios 4 y 5 de la Tabla 5.1.	77
5.22. Mediciones de todas las campañas.	80
5.23. Puntos reales, estimados y error de estimación.	81
5.24. Comparación del presente trabajo de titulación con [15].	83
5.25. Tiempo de procesamiento de un punto particular.	84
5.26. Error de estimación del escenario de 90 m×90 m con 4 nodos ancla en la hacienda Irquis.	84
5.27. Error de estimación del escenario de 90 m×90 m con 5 nodos ancla en la hacienda Irquis.	85
A.1. Distribución escenario no simétrico de simulación.	95
B.1. Distribución de frecuencias para la región 2 y en Ecuador [16].	97
C.1. Características principales de las tarjetas de desarrollo FiPy LoPy [8–12].	100
C.2. Características técnicas de chips SX1272 y SX1276 [8–12].	102
D.1. Materiales para el diseño de los PCBs.	104
D.2. Consideraciones de diseño del PCB de control del nodo objetivo.	104
D.3. Consideraciones de diseño del PCB de control del nodo ancla.	105
F.1. Parámetros de modulación LoRa.	121
F.2. Configuración del chip LoRa.	122
F.3. Configuración de paquetes.	122
F.4. Configuración RF.	122
F.5. Resultados de rendimiento de tiempo, RF y consumo energético con parámetros de modulación LoRa de la Tabla F.1.	123



Cláusulas



Cláusula de Propiedad Intelectual

Braulio Vinicio Arpi Saquipay, autor del trabajo de titulación "Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para un sistema de localización basado en tecnología LoRa", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de abril de 2019

Braulio Vinicio Arpi Saquipay

C.I: 0104418587



Cláusula de Propiedad Intelectual

Christian Paúl Sánchez Venenaula, autor del trabajo de titulación "Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para un sistema de localización basado en tecnología LoRa", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de abril de 2019

Christian Paúl Sánchez Venenaula

C.I: 0105736748



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Braulio Vinicio Arpi Saquipay en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para un sistema de localización basado en tecnología LoRa”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de abril de 2019

Braulio Vinicio Arpi Saquipay

C.I: 0104418587



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Christian Paúl Sánchez Venenaula en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis comparativo de algoritmos de posicionamiento para un sistema de localización basado en tecnología LoRa", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de abril de 2019

Christian Paúl Sánchez Venenaula

C.I: 0105736748

Dedicatoria

A mi padres.

A mi madre Inés por estar cada día a mi lado, cada obstáculo, cada caída el que me ayudaba a levantarme con más fuerza para continuar mi camino siendo una persona de bien.

A mi padre Manuel por apoyarme con su sabiduría y su consejo en los momentos de duda para que cada día se una mejor persona. Aunque la distancia nos separe físicamente, siempre lo he tenido presente en mi corazón en el que se quedará por siempre.

Braulio Arpi



Dedicatoria

Dedico la culminación del presente trabajo de titulación a toda mi familia porque sin su apoyo y motivación este sueño no se hubiera hecho realidad.

Especialmente a mis padres Hernán y Monserrath que supieron aconsejarme correctamente durante mis estudios y durante el desarrollo del presente trabajo.

Por otra parte, a mis hermanos Doménica, Alejandro y Sebastián que son mi motivación para superarme día a día en el ámbito académico y personal. También al resto de mis familiares cercanos abuelita Elvia, tíos, tías y primos por su apoyo incondicional.

Finalmente dedico el trabajo al buen grupo de amigos de clase del grupo Combitos S.R. que a lo largo de los años de estudio nos hemos enfrentado a muchos retos académicos y personales; y entre todos hemos aprendido a tomar las mejores decisiones y seguir adelante.

Christian Sánchez

Agradecimientos

Culminar un trabajo de titulación requiere de mucho esfuerzo y dedicación. Por una parte de los autores y por otra de todas las demás personas que a lo largo del desarrollo del trabajo contribuyeron con comentarios buenos y malos que ayudaron a su elaboración.

Un agradecimiento especial a nuestros familiares por el apoyo incondicional durante el desarrollo del trabajo de titulación.

A nuestros amigos de clase del grupo Combitos S.R. porque durante nuestra etapa de estudiantes siempre enfrentamos a los desafíos académicos y personales; y juntos supimos resolverlos de la mejor manera.

Al Club de Robótica de la Universidad de Cuenca (CRUC) por apoyarnos en nuestra etapa de estudiantes y durante el desarrollo del trabajo de titulación por permitirnos usar sus instalaciones e instrumentos.

Los autores



Abreviaciones y Acrónimos

- ABP** Activation By Personalization. [22](#), [23](#)
- AoA** Angle of Arrival. [9–11](#), [15](#), [33](#), [34](#), [41](#), [42](#), [86](#)
- APIT** Approximate Point In Triangle. [28](#), [30](#)
- ARCOTEL** Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. [97](#)
- BLE** Bluetooth Low Energy. [98](#), [100](#)
- BW** BandWidth. [18](#), [20](#), [34–38](#), [40](#), [47](#), [48](#), [58](#), [100–102](#), [107](#), [113](#), [114](#), [120–122](#)
- CDMA** Code Division Multiple Access. [15](#)
- CR** Condng Rate. [48](#), [107](#), [119–122](#)
- CRC** Cyclic Redundancy Check. [119](#), [120](#), [122](#)
- CSS** Chirp Spread Spectrum. [18](#), [19](#)
- DEET** Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. [3](#)
- DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum. [18](#), [20](#)
- FEC** Forward Error Correction. [20](#), [120](#)
- FSK** Frequency Shift Keying. [20](#), [21](#)
- FTP** File Transfer Protocol. [37](#), [47–49](#), [51](#), [52](#), [54](#), [104](#), [107](#), [111](#)
- GLONASS** Global Navigation Satellite System. [13](#)
- GNSS** Global Navigation Satellite System. [13](#), [17](#)
- GPS** Global Positioning System. [1](#), [3](#), [13](#), [14](#), [24–28](#), [30](#), [31](#)
- GSM** Global System for Mobile Communication. [3](#), [24](#), [30](#), [31](#)
- IGBA** Incremental Grid Based Approach. [28](#), [30](#), [81](#), [83](#)
- IoT** Internet of Things. [98](#)
- ISM** Industrial, Scientific and Medical. [17](#), [34](#), [35](#), [51](#), [52](#), [97](#), [98](#), [100](#)
- ITU** International Telecommunication Union. [97](#)
- LBS** Location Based Service. [1](#)



- LoRa** Long Range. 1–5, 17, 18, 20, 21, 23–25, 27, 28, 30–38, 43, 45–48, 50, 51, 56, 58, 61, 64, 79, 83, 87, 88, 98–101, 104, 105, 107, 111, 113, 114, 119–121
- LoRaWAN** Long Range Wide Area Network. 2, 17, 18, 21, 22, 25–28
- LoS** Line of Sight. 11, 15, 27, 29, 43, 81
- LPS** Local Positioning System. 2
- LPWAN** Low Power Wide Area Network. 2, 17, 18, 21, 25
- MAC** Media Access Control. 21, 29
- MAI** Multiple Access Interference. 15
- MAN** Metropolitan Area Network. 26, 28
- NB-IoT** NarrowBand IoT. 2
- NLoS** Non Line of Sight. 15, 34
- OTAA** Over-The-Air Activation. 22
- PCB** Printed Circuit Board. 32, 34, 46, 47, 103–105, 107
- PLM** Path-Loss Model. 5, 12, 16, 28, 30, 31, 42, 45, 48, 52, 65, 67, 68, 88
- PS** Positioning System. 1–3, 5, 6, 13, 16, 24–29, 31–34, 38, 42, 44, 46, 47, 49, 51, 52, 56–60, 62–65, 68, 72–77, 79, 81, 83–85, 87–89, 92–94, 98, 104, 105, 114, 121, 122
- PXI** PCI eXtensions for Instrumentation. 113, 114
- REPL** Read-Eval-Print-Loop. 37, 54
- RF** Radio Frecuencia. 3, 5, 24, 32, 33, 36, 37, 56, 86–88, 99, 100, 104, 121, 123
- RSSI** Received Signal Strength Indicator. 3, 4, 10, 11, 13, 15, 16, 26, 28–31, 33–38, 41–54, 56, 58, 59, 61, 64, 65, 67, 68, 72–74, 79, 81, 83, 85–89, 92, 100, 104, 107
- RTC** Real Time Clock. 33, 35, 39, 100
- RTT** Round-Trip Delay Time. 34–36
- SF** Spreading Factor. 18, 20, 26, 34–38, 47, 48, 58, 100–102, 107, 120–122
- SNR** Signal to Noise Ratio. 18, 20, 47, 48, 52–54, 107
- SS** Spread Spectrum. 18, 100
- TCP** Transmission Control Protocol. 50
- TDoA** Time Difference of Arrival. 3, 4, 8, 10, 11, 15, 16, 25, 26, 29, 31, 32, 34, 36, 41, 42, 86, 88, 89
- ToA** Time of Arrival. 3, 4, 6–11, 15, 16, 29, 32, 34, 36, 41, 42, 86, 88, 89, 92
- ToF** Time of Fligth. 15, 29, 30, 83
- WOLoc** WiFi-only Outdoor Localization. 26
- WSN** Wireless Sensor Network. 2, 28, 29



Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se identifican los problemas de diseño e implementación de un sistema de posicionamiento ([Positioning System \(PS\)](#)) usando tecnología de largo alcance ([Long Range \(LoRa\)](#)). Además, se define el alcance del presente trabajo.

1.1. Identificación del problema

Hoy en día ubicar a personas u objetos es importante en varios campos; por ejemplo, en el campo comercial, el conocer la ubicación de los productos de una empresa reduce el tiempo de búsqueda y por lo tanto los costos de operación. En general, al proceso utilizado para estimar la ubicación se le conoce como localización [17]. La localización estima una posición relativa en relación con otras posiciones conocidas dentro de un sistema de coordenadas. En este contexto, existen servicios de localización que tienen como principal objetivo reducir el error de estimación de la ubicación [17].

Los servicios basados en localización ([Location Based Services \(LBSs\)](#)), son soluciones en tiempo real basadas en esquemas móviles cliente-servidor. Por ejemplo: (1) en una solución de rescate de víctimas el sistema sería usado para la detección rápida de la posición la víctima; (2) en una solución de rastreo y navegación, se usaría la combinación de diferentes métodos de localización para ubicar a los usuarios en medios de transporte [18].

El método de localización más usado alrededor del mundo es el sistema de posicionamiento global ([Global Positioning System \(GPS\)](#)). Sin embargo, cuando un [PS](#) requiere una gran cantidad de dispositivos pequeños, baratos y de baja potencia; [GPS](#) tiene consideraciones prácticas que impiden su uso [19]. Entre las consideraciones más importantes están el consumo energético, que resulta en una reducción del tiempo de vida de la red, y el costo de implementación de la

red inalámbrica de sensores ([Wireless Sensor Network \(WSN\)](#)) cuando ésta tiene una gran cantidad de nodos [20]. Actualmente, se están desarrollando sistema de procesamiento alternativos de bajo costo. Estos sistemas están creados para funcionar en entornos locales conocidos como sistemas de posicionamiento local ([Local Positioning Systems \(LPSs\)](#)).

1.2. Justificación

Actualmente la variedad de tecnologías inalámbricas de bajo costo y baja potencia permiten el despliegue de redes densamente distribuidas para una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo: monitoreo ambiental, monitoreo de animales, humanos, o vehículos [21–23], de atletas [24], entre otras. En tales aplicaciones, el requerimiento de potencia y de tasa de datos requeridos para la red es mínimo. En este contexto, emerge la red de área amplia de baja potencia ([Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#)), la cual, está diseñada para transportar datos entre dispositivos a grandes distancias [25, 26].

Las [LPWANs](#) que destacan actualmente son: [LoRa](#) [27], *Sigfox* [28], a más de soporte de redes celulares o móviles, por ejemplo: el internet de las cosas de banda estrecha ([NarrowBand IoT \(NB-IoT\)](#)) [29]. Actualmente, la gran cantidad de trabajos de investigación sobre escalabilidad, cobertura y eficiencia energética de las tecnologías [LoRa](#) y su derivado la red de área amplia de largo alcance ([Long Range Wide Area Network \(LoRaWAN\)](#)) afirman que tienen grandes potenciales para sistemas de posicionamiento alternativos, en comparación con las otras [LPWANs](#) [30–32].

En este contexto, un sistema de posicionamiento requiere que la adquisición de datos sea en tiempo real. Como puede verse en la Figura 1.1, por lo general consta de tres partes fundamentales: el método de estimación de la posición, el algoritmo de localización y la visualización de la posición estimada [1].

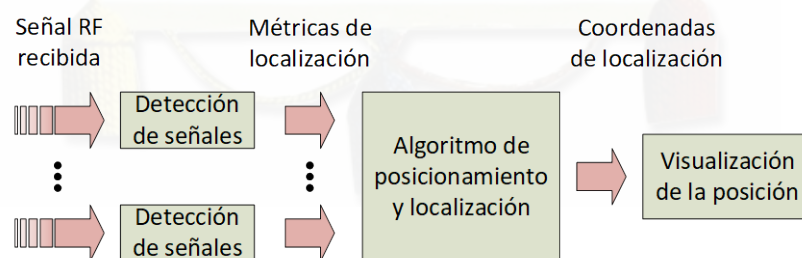


Figura 1.1: Sistema de localización inalámbrico [1].

Bajo este contexto, el presente trabajo de titulación analiza la factibilidad de algoritmos de posicionamiento implementados en un servicio basado en localización. Para esto, el presente trabajo se centra en el diseño e implementación de un [PS](#) de bajo costo basado en la tecnología



LoRa. La idea principal es prescindir del uso del **GPS** [33], eliminando el riesgo informático de los dispositivos móviles con esta tecnología [34] pero sobre todo el alto consumo energético [35].

1.3. Alcance

La contribución del presente trabajo de titulación es analizar la factibilidad de implementar un sistema de posicionamiento de bajo costo basado en la tecnología **LoRa**. Para esto, en primer lugar, es importante estimar la posición del nodo objetivo dentro de los escenarios de medición. Cada escenario de medición, está formado por un nodo central del cual se desea conocer la ubicación y 3, 4 o 5 nodos ancla. Mientras más nodos ancla exista en el **PS**, el requisito computacional necesario para el procesamiento de los algoritmos de localización también aumenta [22]. El nodo central y los nodos ancla son dispositivos de tecnología **LoRa**, específicamente dispositivos **FiPy** y **LoPy** en sus versiones 1.0 y 4.0. De acuerdo a la disponibilidad de equipos del **Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET)** de la Universidad de Cuenca.

En segundo lugar, es importante seleccionar los algoritmos de posicionamiento adecuados en función de los equipos disponibles. Por tanto, es necesario realizar un análisis comparativo de diversos algoritmos de posicionamiento, por ejemplo: tiempo de llegada (**Time of Arrival (ToA)**), diferencia de tiempo de llegada (**Time Difference of Arrival (TDoA)**), indicador de intensidad de señal recibida (**Received Signal Strength Indicator (RSSI)**), entre otros. En consecuencia, los algoritmos seleccionados, en función de las características de radio frecuencia (**Radio Frecuencia (RF)**) de los dispositivos con tecnología **LoRa**, serán implementados en el **PS**. El resultado de este análisis es útil para definir las limitantes respecto a la distancia entre nodos ancla y escenarios de medición.

Adicionalmente, los resultados obtenidos sobre errores de estimación del sistema de posicionamiento en los diversos escenarios de medición, sirven para comparar con trabajos similares que utilizan otras tecnologías como: **WiFi**, **Zigbee**, sistema global de comunicación móvil (**Global System for Mobile Communication (GSM)**) de gama baja; y tecnologías **LoRa** de gama alta con funciones de localización incorporadas de fabricantes como: *Cisco* [36], *Semtech* [37], *Kerlink* [38], entre otros [35]. Con el objetivo final, de comparar el rendimiento del sistema de localización implementado en este trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar la factibilidad de implementar algoritmos de posicionamiento en un sistema de localización basado en tecnología **LoRa**.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar y comparar el estado del arte sobre algoritmos clásicos de posicionamiento.
- Implementar los algoritmos seleccionados en base a una investigación teórica.
- Definir los escenarios en los cuales se evaluarán los algoritmos (número de anclas; distancia entre anclas; uso de [ToA](#), [TDoA](#) o [RSSI](#)).
- Definir las métricas con las que se van a evaluar los algoritmos.
- Diseñar e implementar un sistema de posicionamiento basado en la tecnología [LoRa](#).
- Analizar los resultados en función de las métricas propuestas.



Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se muestra la estructura y el funcionamiento de un sistema de posicionamiento. Con el objetivo de conocer la terminología utilizada sobre los algoritmos de posicionamiento y localización. También, se muestra el funcionamiento de la modulación **LoRa** en redes de área amplia y baja potencia. Adicionalmente, se indican algunos conceptos para determinar un modelo de pérdidas por trayectoria (**Path-Loss Model (PLM)**), que depende del indicador de la intensidad de la señal recibida, una característica **RF** incorporada en la mayoría de los dispositivos actuales.

2.1. Introducción

Actualmente las redes inalámbricas de sensores están desplegadas alrededor del mundo y realizan desde tareas simples a complejas de intercambio de información. Una tarea compleja y de mucha importancia social está relacionada con los servicios de localización. Por esta razón, es importante conocer la terminología correcta de los sistemas de posicionamiento, respecto a: la arquitectura; la disposición de dispositivos; los algoritmos de posicionamiento y de localización.

2.2. Clasificación de los sistemas de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento pueden ser clasificados en dos categorías. Por un lado, el sistema de posicionamiento global que permite localizar objetivos alrededor del planeta. Por otro lado, el sistema de posicionamiento local que es un **PS** relativo y puede ser clasificado en auto y remoto. Un auto **PS** permite a cada persona u objeto encontrar su propia ubicación con respecto a un punto estático. Por otro lado, un **PS** remoto permite a cada nodo encontrar la

posición relativa de otros nodos localizados dentro de su área de cobertura, en este escenario los nodos pueden ser estáticos o dinámicos. Desde el punto de vista del objetivo, los PSs remotos se dividen en: objetivo activo y pasivo. En el primer caso, el objetivo es activo y coopera en el proceso de posicionamiento, mientras en el segundo, el objetivo es pasivo y no coopera (véase Figura 2.1) [2].

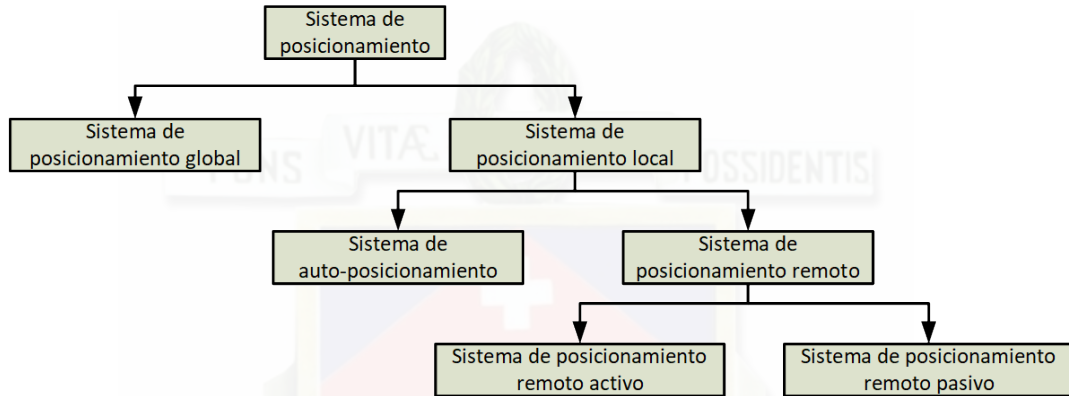


Figura 2.1: Clasificación de un PS [2].

2.3. Técnicas de estimación de la posición

Las técnicas de estimación de la posición son conocidas como algoritmos de posicionamiento. A continuación, se presentan las principales técnicas usadas por los sistemas de posicionamiento.

2.3.1. Tiempo de llegada (ToA)

En la estimación de ToA, múltiples nodos ancla con posiciones conocidas colaboran para localizar al nodo objetivo. De acuerdo a la Figura 2.2, en un escenario coplanar se requiere un mínimo de tres nodos ancla para localizar al nodo objetivo mediante mediciones de ToA. Por otra parte, en un escenario no coplanar, se requiere de al menos cuatro nodos ancla. De este modo, para un escenario tridimensional, con ayuda de la distancia entre nodo ancla y objetivo, se localiza la posición del nodo objetivo dentro de una esfera de radio R_i con el receptor i en el centro de la esfera, donde R_i es directamente proporcional al ToA τ_i .

Aunque ToA parece ser un método robusto, tiene algunas limitaciones. En primer lugar, requiere que los nodos ancla y el nodo objetivo estén sincronizados, es decir, un pequeño error en tiempo puede llevar a un gran error en el cálculo de la distancia R_i . Adicionalmente, son necesarios relojes con precisión de nanosegundos para obtener buenos resultados de localización [2].

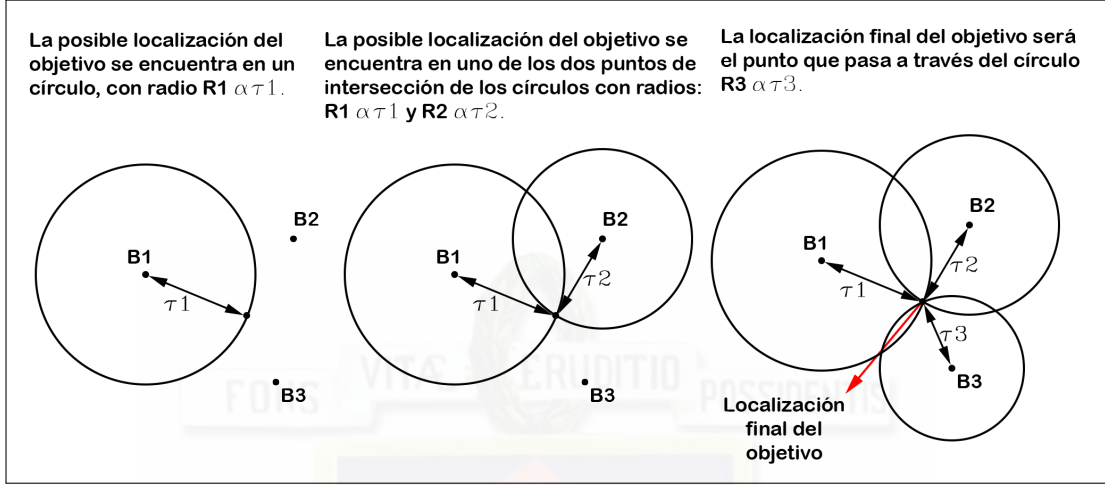


Figura 2.2: Operación de las estimaciones ToA y RSSI [2].

2.3.1.1. Algoritmos de estimación de la ubicación para ToA

En un escenario tridimensional para **ToA**, la posición del nodo objetivo se determina mediante la intersección de todas las esferas; cuyos centros son las coordenadas de los nodos ancla y los radios son las distancias entre el nodo ancla y el nodo objetivo. Las esferas pueden ser descritas mediante la Ecuación 2.1.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = m_i^2, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.1)$$

Donde:

(x_i, y_i, z_i) , son las coordenadas conocidas de los nodos ancla,

m_i , son las estimaciones de las distancias entre los nodos ancla y el nodo objetivo,

n , es el número de nodos ancla,

(x, y, z) , son las coordenadas del nodo objetivo.

Para resolver el sistema de ecuaciones resultante (Ecuación 2.2), se utilizan diversos algoritmos de estimación, por ejemplo: método analítico, mínimos cuadrados o series de *Taylor* [39, 40]. El Apéndice A presenta la resolución del sistema de ecuaciones para un escenario bidimensional mediante el método analítico.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = m_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = m_2^2 \\ \dots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = m_n^2 \end{cases} \quad (2.2)$$

2.3.2. Diferencia de tiempo de llegada (TDoA)

En la estimación **TDoA**, los nodos ancla con posiciones conocidas se representan mediante una hipérbola, que es el lugar geométrico de un punto en el plano. De este modo, la diferencia de distancias entre dos puntos fijos, llamados focos y correspondiente a los nodos ancla, es constante.

Como puede verse en la Figura 2.3, en un escenario coplanar se requieren tres nodos ancla y dos mediciones **TDoA** para localizar al nodo objetivo. Como se muestra en dicha figura, el nodo ancla que recibe primero la señal desde el nodo objetivo es considerado como el nodo ancla de referencia. En un escenario no coplanar, se requiere la posición de al menos cuatro nodos ancla y tres mediciones **TDoA**.

Respecto a la limitación de **TDoA** de manera similar a **ToA** se requiere relojes con precisión de nanosegundos para obtener buenos resultados de localización [2].

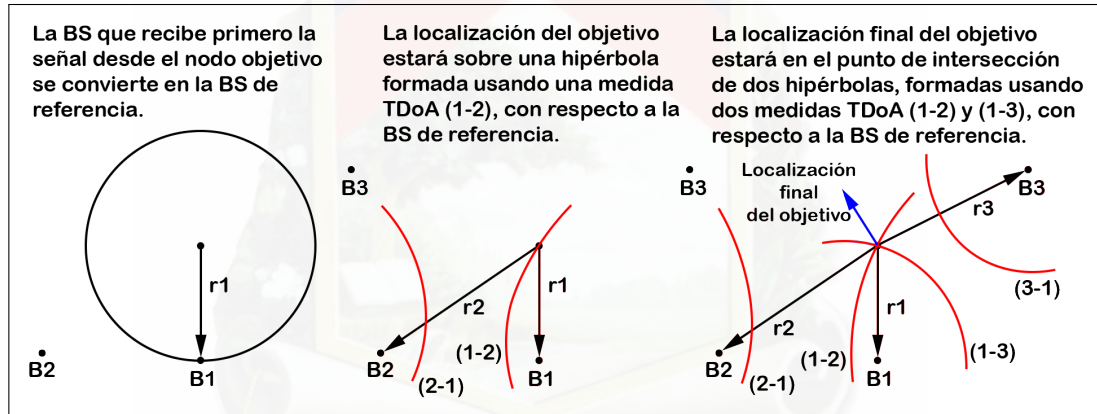


Figura 2.3: Operación de la estimación TDoA [2].

Por otra parte, como se muestra en la Figura 2.4, **ToA** es la duración de tiempo (o tiempo relativo) entre el tiempo de inicio (t_s) de la señal en el transmisor (nodo objetivo) y el tiempo final (t_i) de la señal en el receptor (nodo ancla B_i). Sin embargo, **TDoA** es la diferencia de tiempo entre los tiempos finales (t_i y t_j) de la señal transmitida a dos receptores (nodos ancla B_i y B_j). Por lo tanto, en el método **TDoA**, solo los relojes de los nodos ancla deben sincronizarse para garantizar el mínimo error de medición [2].

2.3.2.1. Algoritmos de estimación de la ubicación para TDoA

En un escenario tridimensional para **TDoA**, la posición del nodo objetivo se determina seleccionando un nodo de referencia, en este caso con respecto al primer nodo, por lo tanto:

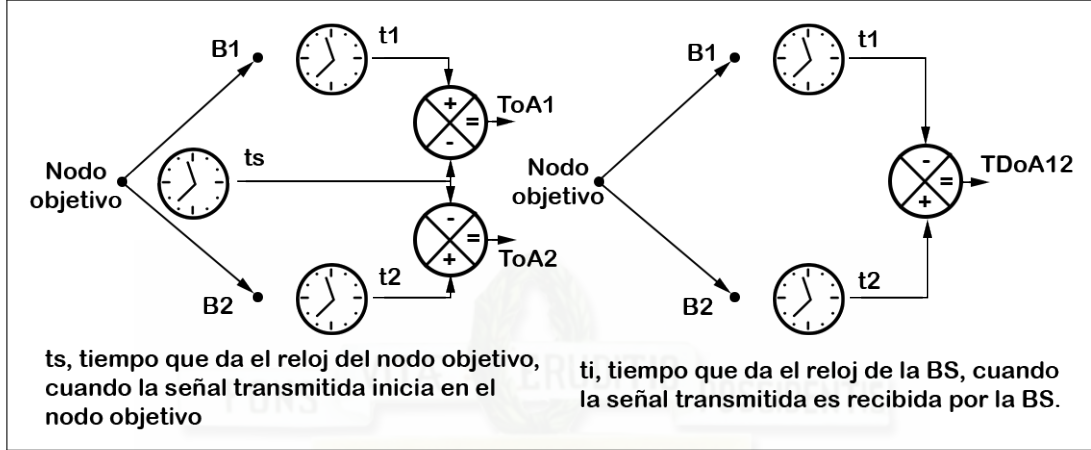


Figura 2.4: Comparación entre las estimaciones ToA y TDoA [2].

$$m_{i,1} = r_i - r_1, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.3)$$

Donde:

(x_i, y_i, z_i) , son las coordenadas conocidas de los nodos ancla,
 m_i , son las estimaciones de rango de la diferencia de tiempo de llegada,
 r_i , son las verdaderas distancias entre el nodo objetivo y el nodo ancla,
 n , es el número de nodos ancla,
 (x, y, z) , son las coordenadas del nodo objetivo.

Para resolver el sistema de ecuaciones resultante (Ecuación 2.4), al igual que para el caso ToA se utilizan diversos algoritmos de estimación, por ejemplo: método analítico, mínimos cuadrados o series de Taylor [39, 40]. El Apéndice A presenta la resolución del sistema de ecuaciones para un escenario bidimensional mediante el método analítico.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (r_1 + m_{2,1})^2 \\ \dots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = (r_1 + m_{n,1})^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3.3. Ángulo de llegada (AoA)

En la estimación ángulo de llegada (Angle of Arrival (AoA)), como se observa en la Figura 2.5 los nodos ancla determinan el ángulo de la señal de llegada. Es decir, cada nodo ancla debe estar equipado con arreglos de antenas. Por lo tanto, esto resulta en un alto costo, complejidad y consumo energético.

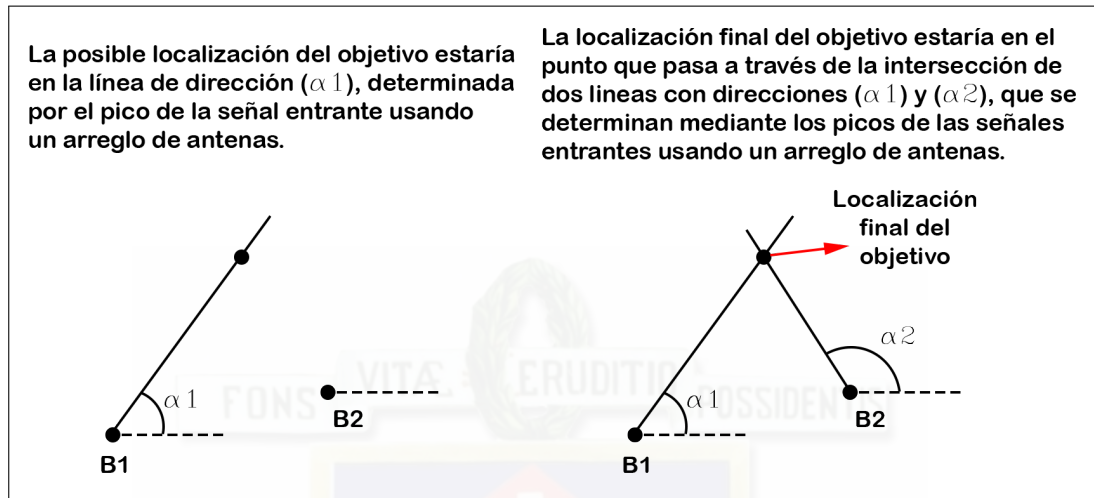


Figura 2.5: Operación de la estimación AoA [2].

Similar a la estimación [ToA](#) y [TDoA](#), en la estimación de [AoA](#), las posiciones de los nodos ancla deben ser conocidas. Pero, a diferencia de [ToA](#) y [TDoA](#), para un escenario coplanar, solo se requieren dos nodos ancla junto con dos mediciones [AoA](#). En cambio, para un caso no coplanar, se requieren tres nodos ancla [2].

2.3.4. Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)

Una medida que está en todo sistema inalámbrico es la intensidad de la señal recibida. A pesar de que típicamente los sistemas de posicionamiento basados en esta medición son menos exactos que los sistemas basados en [ToA](#), [RSSI](#) aún es una muy importante técnica debido a su simplicidad en la implementación. Además, es necesario usar un modelo de pérdidas por trayectoria.

El algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) es similar a la estimación [ToA](#), en donde, múltiples nodos ancla colaboran para localizar el objetivo utilizando las distancias entre nodos ancla y nodo objetivo, como se observa en la Figura 2.2. Además, el algoritmo [RSSI](#) necesita conocer las características de potencia de transmisión los dispositivos. También, se necesita un modelo del canal en el que se está transmitiendo la señal; que predice las características de atenuación de la señal de radio en función de la distancia [41]. En un escenario coplanar, se requieren tres nodos ancla y tres mediciones [RSSI](#). La Tabla 2.1 muestra una comparación entre los métodos de estimación de la posición indicando las ventajas y desventajas en cada caso [2].

Método	Ventajas	Desventajas
ToA	Exactitud alta.	Necesita de sincronización en el orden de los nanosegundos entre el nodo objetivo y los nodos ancla, necesita de línea de vista (Line of Sight (LoS)).
TDoA	Exactitud alta, requiere sincronización únicamente entre nodos ancla.	Necesita de LoS .
RSSI	Simple y de bajo costo, no requiere sincronización.	Exactitud baja.
AoA	Requiere al menos 2 receptores, no requiere sincronización.	Necesita antenas inteligentes, necesita LoS .

Tabla 2.1: Comparación entre métodos de estimación de la posición.

2.4. Algoritmos de localización

Los algoritmos de localización dependen de las restricciones de implementación que tengan los dispositivos disponibles [3, 4]. Hay tres principios fundamentales usados en las técnicas de localización tradicionales: triangulación, trilateración y multilateración, mismos que se describen a continuación.

2.4.1. Triangulación

El método de triangulación se basa en la estimación [AoA](#) (Figura 2.5) de la señal del dispositivo que se desea localizar [1].

2.4.2. Trilateración

El método de trilateración requiere 3 nodos ancla y usa la distancia entre el nodo ancla y el nodo objetivo. En un escenario bidimensional, el nodo objetivo se localiza mediante el punto de intersección de 3 círculos. Donde, cada círculo tiene por radio la distancia entre el nodo ancla y el nodo objetivo [1]. Algunos algoritmos de posicionamiento que utilizan trilateración son: [ToA](#) y [RSSI](#) (Figuras 2.2 y 2.3).

2.4.3. Multilateración

El método de multilateración no necesita que el receptor este sincronizado con el transmisor. Este método es similar a trilateración, excepto que no requiere de un círculo. En cambio, requiere una hipérbola en escenarios bidimensionales y un hiperboloide en escenarios tridimensionales. El algoritmo de posicionamiento que utiliza multilateración es [TDoA](#) [22].

2.5. Modelo de pérdida por trayectoria (PLM)

Existen muchos **PLMs** teóricos que varían en su aplicación, son modelos para entornos de bosques, ríos, zonas urbanas, entre otros. La mayoría de los **PLMs** comúnmente llevan la forma de pérdida logarítmica de espacio libre como se expresa en la Ecuación 2.5 [42].

$$P_L(dB) = P_0 + 20 \times \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (2.5)$$

Donde:

d , es la distancia de transmisión,

d_0 , es la distancia de referencia,

P_0 , es la potencia a la distancia d_0 ,

X_σ , es una variable aleatoria de distribución *gaussiana*, de la señal recibida con media cero y desviación estándar σ .

Existe una gran cantidad de investigaciones sobre el rango de evaluación de los **PLMs**. Se concluye que, en la mayoría de los ambientes, el canal tiene un comportamiento logarítmico, y se presenta la Ecuación 2.6 para un **PLM** [42–44].

$$P_L(dB) = a + b \times \log d + X_\sigma \quad (2.6)$$

Donde:

a y b , son ajustados mediante los valores obtenidos en las campañas de medición,

X_σ , es la variable estocástica debido al ruido y al desvanecimiento multirayectoria,

b , es el factor exponencial de distancia,

a , representa la potencia transmitida y la ganancia del sistema.

En todos los ambientes inalámbricos, la intensidad de la señal recibida es equivalente a la potencia recibida y puede expresarse como:

$$RSSI = R_p = T_p + G_t + G_r - P_L \quad (2.7)$$

Donde:

R_p , es la potencia recibida en dBm,

T_p , es la potencia transmitida en dBm,

G_t, G_r , son las ganancias de las antenas de transmisión y recepción respectivamente en dBi,

P_L , es el modelo de pérdidas por trayectoria en dB.

Por otra parte, una manera sencilla de obtener la ecuación del modelo es mediante programas dedicados al análisis estadístico. Por ejemplo, el programa *Excel* permite obtener una línea de

tendencia logarítmica mediante el ajuste de mínimos cuadrados de las mediciones RSSI basado en la Ecuación 2.8

$$y = c \times \ln x + b \quad (2.8)$$

Donde:

c y b , son constantes,

\ln , es la función logarítmica natural.

2.6. Sistemas de posicionamiento (PSs)

Durante los últimos años se ha visto una demanda cada vez mayor de servicios y sistemas que dependen de la ubicación de personas y objetos. Esto ha llevado al desarrollo y evolución de numerosos sistemas de posicionamiento. Por ejemplo: el sistema global de navegación por satélite ([Global Navigation Satellite System \(GNSS\)](#)) [2].

2.6.1. Sistema global de navegación por satélite (GNSS)

Es una constelación de satélites que transmiten datos de posicionamiento y temporización a receptores GNSS. Los receptores luego usan estos datos para determinar la ubicación. Por ejemplo, el GPS es el más popular entre los GNSSs actuales perteneciente al Departamento de Defensa de los Estados Unidos. También, existe una versión de Rusia denominada [Global Navigation Satellite System \(GLONASS\)](#) [2].

2.6.1.1. Sistema de posicionamiento global (GPS)

El GPS se basa en una constelación de 27 satélites que orbitan la tierra (24 en funcionamiento y 3 extras en caso de que uno falle). Usando estos satélites, una persona u objeto puede localizar su posición en términos de latitud, longitud y altitud. Estos satélites orbitan la tierra a una altura de 20,000 km y completan dos rotaciones cada 24 horas. Las órbitas de estos satélites están dispuestas de tal manera que, en cualquier momento dado, en cualquier lugar de la tierra, al menos 4 satélites son claramente visibles. Por lo tanto, un receptor GPS colocado en la tierra puede localizar su posición utilizando cualquier conjunto de 4 satélites visibles [2].

Aunque el GPS es el método de localización más usado alrededor del mundo, tiene consideraciones prácticas que impiden su uso cuando un PS requiere una gran cantidad de dispositivos pequeños, baratos y de baja potencia. Entre las consideraciones más importantes están el con-

sumo energético, que resulta en una reducción del tiempo de vida de la red, y el costo de implementación de la red cuando ésta tiene una gran cantidad de nodos [20].

En este contexto, para el correcto funcionamiento del GPS se requiere que los relojes del receptor y del satélite estén perfectamente sincronizados. La sincronización del reloj se requiere con precisión de nanosegundos. Por lo tanto, en condiciones ideales, tanto el receptor como el satélite deben estar equipados con relojes de alta precisión, por ejemplo, relojes atómicos. Sin embargo, dado que estos relojes son caros, los fabricantes de receptores usualmente usan relojes de cuarzo ordinarios que introducen error en la sincronización. Luego, para determinar la distancia se utiliza el retraso del tiempo de propagación entre la señal transmitida por el satélite y la generada en el receptor. El tiempo de propagación debe multiplicarse por la velocidad de la luz para obtener la distancia entre el receptor y el satélite. La distancia obtenida debe usarse en algoritmos de localización como: triangulación, trilateración, y multilateración para estimar la posición del receptor. GPS utiliza multilateración para encontrar la posición tridimensional de un objetivo [2].

2.6.2. Técnicas de radiolocalización

Un sistema de radiolocalización mide las señales de radio que viajan entre la estación móvil y la estación base. Los recientes avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de dispositivos de bajo costo y baja potencia. Estos son dispositivos autónomos integrados con características de radiolocalización. La tecnología que emerge para estas aplicaciones de redes inalámbricas de comunicaciones, es conocida como servicios basados en localización. Como se muestra en la Figura 2.6, hoy en día, existen desde rango corto como: *Bluetooth*, WiFi, Zigbee hasta rango amplio como las redes de telecomunicaciones [2-4].

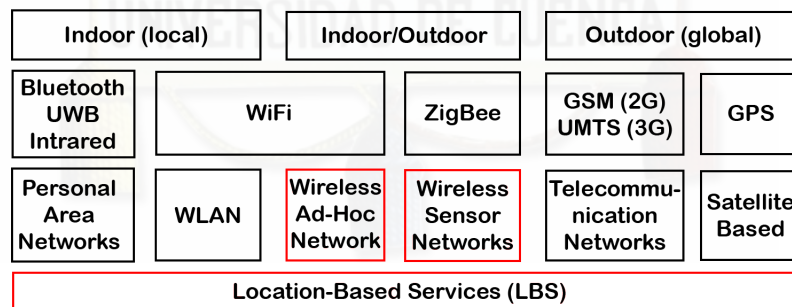


Figura 2.6: LBS para un amplio rango de redes inalámbricas [3, 4].

Por ejemplo, en sistemas de localización para redes celulares, el proceso de localización consiste básicamente en establecer comunicación entre la estación base y la estación móvil con diversas tecnologías celulares en el mercado como: 2G, 3G y 4G. Son necesarios diversos métodos para

implementar servicios de localización en estos sistemas. El método [RSSI](#) no se implementa en sistemas celulares, debido a que es susceptible a fuentes de error, como: ensombrecimiento o desvanecimiento multitrayectoria. En cambio, el método [AoA](#) requiere de arreglos de antenas en las estaciones base que resulta extremadamente costoso. Por otra parte, los métodos [ToA](#) y [TDoA](#) son los más utilizados y proporcionan información del tiempo de vuelo ([Time of Flight \(ToF\)](#)) de las señales entre la estación móvil y la estación base [\[45\]](#).

2.6.3. Fuentes de error en sistemas de localización

Las fuentes de error comunes para sistemas de localización, incluyen: propagación multitrayectoria, propagación sin línea de vista e interferencia de acceso múltiple ([Multiple Access Interference \(MAI\)](#)).

2.6.3.1. Propagación multitrayectoria

La propagación multitrayectoria se define como la recepción de múltiples señales en la estación móvil o estación base. Estas señales contribuyen constructivamente (amplificando la señal) o destructivamente (atenuando la señal) y resulta en el fenómeno denominado desvanecimiento. Esto hace que sea difícil determinar la exactitud de las estimaciones: [RSSI](#), [ToA](#), [TDoA](#) y [AoA](#) en sistemas inalámbricos. Por ejemplo, en la estimación [RSSI](#) se introduce error en el modelo de pérdidas por trayectoria del canal. Del mismo modo, en la estimación [AoA](#), aunque es posible detectar múltiples ángulos de incidencia en el arreglo de antenas, es una opción costosa. Por otra parte, en sistemas de posicionamiento basados en tiempo, la propagación multitrayectoria causa errores en la estimación de tiempo [\[5\]](#).

2.6.3.2. Propagación sin línea de vista

Cuando el camino directo o con [LoS](#) entre la estación móvil y la estación base se encuentra bloqueado por alguna estructura (por ejemplo: edificios o montañas). Este efecto se conoce como propagación sin línea de vista ([Non Line of Sight \(NLoS\)](#)) y como se observa en la [Figura 2.7](#) la señal se refleja o difracta [\[5\]](#).

2.6.3.3. Interferencia de acceso múltiple (MAI)

Todos los sistemas celulares sufren de interferencia co-canal. Por ejemplo, en un acceso múltiple por división de código ([Code Division Multiple Access \(CDMA\)](#)), los usuarios comparten la misma banda de frecuencia con diferentes códigos de propagación. Por lo tanto, sus transmisiones interfieren entre sí, lo que dificulta escuchar a los usuarios más débiles. En un escenario con [LoS](#), la interferencia se genera desde otras estaciones base [\[5\]](#).

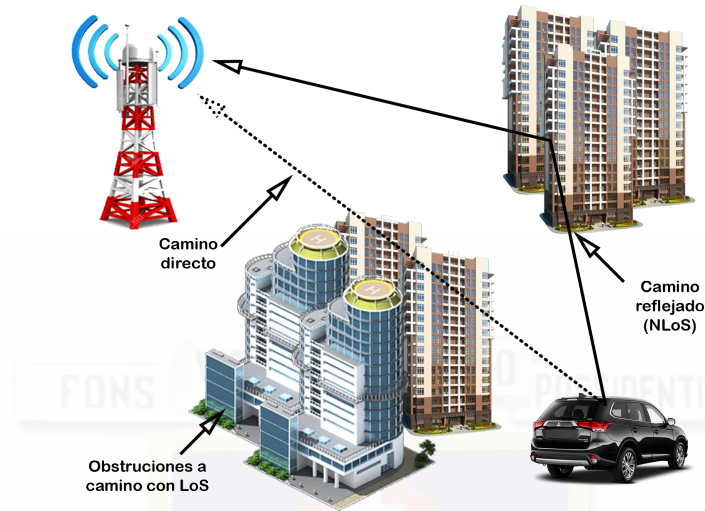


Figura 2.7: Propagación de señales en un escenario NLoS [5].

2.6.4. Estimación de la posición

La estimación de la posición de un usuario o un objeto, se obtiene mediante la intersección de lugares geométricos, resolviendo un sistema de ecuaciones multidimensionales. Dependiendo de las mediciones realizadas, la solución de ubicación se obtiene mediante la intersección de un cierto número de lugares geométricos, como círculos e hipérbolas (en un escenario bidimensional); o esferas, hiperboloides y conos (en un escenario tridimensional). La intersección entre esferas o círculos, así como, la medición de una distancia permite estimar la posición del usuario. Como se observa en la Figura 2.8, los centros de las esferas son los transmisores y los radios son iguales a las estimaciones de distancia.

En este contexto, existen **PSs** basados en la estimación **RSSI** que utilizan **PLMs** para estimar la posición del objetivo. En cambio, algunos **PSs** basados en las estimaciones **ToA** y **TDoA** utilizan diferentes métodos de medición de tiempo en dos vías o una vía para estimar la posición del objetivo. En resumen, cada **PS** tiene diferentes niveles de complejidad y diferentes restricciones en función del algoritmo de posicionamiento seleccionado [2].

2.6.4.1. Mediciones de dos vías

La estimación del tiempo de propagación se realiza midiendo el tiempo de ida y vuelta. Es decir, la señal transmitida es retransmitida por el receptor, y el transmisor evalúa la diferencia entre el tiempo de transmisión y el tiempo de recepción. Tal diferencia incluye el doble del tiempo de propagación entre el transmisor y el usuario más un posible tiempo de latencia debido a la retransmisión (en caso de que el receptor no esté actuando como un reflector ideal para la señal).

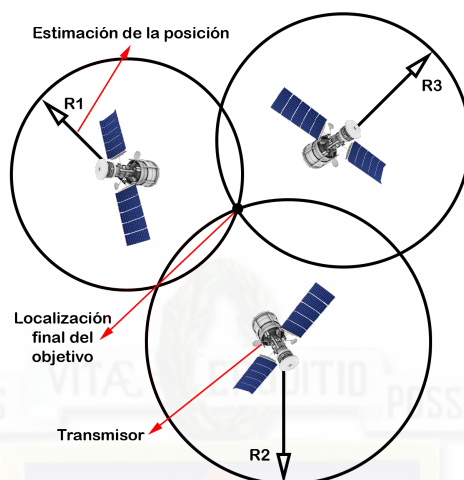


Figura 2.8: Un PS esférico [2].

La principal ventaja de este tipo de medición es que los tiempos de transmisión y recepción se miden en la misma escala de tiempo. De hecho, al tener relojes estables durante el tiempo de ida y vuelta, no se requiere que el transmisor y el reflector estén sincronizados [2].

2.6.4.2. Mediciones de una vía

El tiempo de propagación unidireccional, es cuando, los usuarios solo reciben la señal transmitida por el conjunto de transmisores de referencia (es decir, satélites en el caso del GNSS). Los transmisores y receptores deben estar sincronizados con alta precisión (dentro de docenas de nanosegundos), ya que, tienen una escala de tiempo común [2].

2.7. Red de área amplia de baja potencia (LPWAN)

Las LPWANs están diseñadas para proporcionar un método de comunicación no complejo, barato, confiable y de bajo consumo energético. El rango de comunicación de las LPWANs alcanza teóricamente más de 15 km en zonas rurales y al menos 5 km en zonas urbanas. Adicionalmente, las LPWANs operan en bandas sin licencia Industrial, Scientific and Medical (ISM), que son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial, como por ejemplo: las bandas 433, 868 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos [29]. Actualmente, existen plataformas comerciales disponibles para una LPWAN, como: Sigfox [28], LoRa y LoRaWAN [25].

Actualmente, una LPWAN recopila diferentes tipos de datos, provenientes de: sensores de humedad, sensores de temperatura, entre otros. La mayoría de las LPWANs se basan en la topología estrella, en la que, cada dispositivo interactúa directamente con la estación base. El sensor

transmite datos a través del canal de radio a la estación base, que recibe las señales de todos los sensores dentro de su rango. Después procesa la información recibida y la transfiere al servidor. Los datos recibidos en el servidor se utilizan para tomar decisiones adicionales, como: activar un actuador, activar una alerta, etc [29].

En este contexto, las **LPWANs** están dirigidas principalmente a aplicaciones que requieren la transferencia de pequeñas cantidades de datos con una larga duración de la batería y una gran cobertura de red. Esta tecnología, se aplica en sistemas de control, redes inalámbricas de sensores y sistemas de posicionamiento. Por ejemplo, para comunicaciones en el hogar un sistema de control almacena y controla los servicios básicos de electricidad, agua, gas y ventilación. También, una red de sensores almacena mediciones de temperatura y humedad en granjas inteligentes. Finalmente, los sistemas de posicionamiento actuales se implementan en **LPWANs**, además utilizan tecnología **LoRa** o **LoRaWAN** [7, 29].

2.8. Tecnología LoRa

LoRa es un esquema propietario de modulación de espectro ensanchado (**Spread Spectrum (SS)**), que es derivado de la modulación de espectro ensanchado chirp (**Chirp Spread Spectrum (CSS)**) y que intercambia tasa de datos por sensibilidad dentro de un canal de ancho de banda (**BandWidth (BW)**) fijo. Implementa una tasa de datos variable, utilizando factores de esparcimiento (**Spreading Factors (SFs)**) ortogonales, que permiten al sistema ganar cobertura, cambiando el valor de tasa de datos. Es decir, optimizar el rendimiento de la red en un **BW** constante. Además, **LoRa** es una implementación de capa física y es independiente de las implementaciones de capa superiores. Esto le permite coexistir con otras arquitecturas de red existentes [6].

2.8.1. Espectro ensanchado (SS)

De la teoría de la información, especialmente del teorema de *Shannon-Hartley*, la degradación de la relación señal a ruido (**Signal to Noise Ratio (SNR)**) de un canal de radio, se compensa aumentando el **BW**. Por ejemplo, en el transmisor de un sistema tradicional de espectro ensanchado de secuencia directa (**Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**), los datos deseados se multiplican con un código, conocido como secuencia de chip. El código varía mucho más rápido que la señal de datos, por lo tanto, distribuye el **BW** de la señal más allá del **BW** ocupado solo por la señal original (véase Figura 2.9).

En cambio, en el receptor la señal de datos deseada se recupera multiplicándola con una réplica generada localmente de la secuencia de chip. Este proceso de multiplicación en el receptor comprime la señal de propagación a su **BW** original (véase Figura 2.10). Una regla importan-

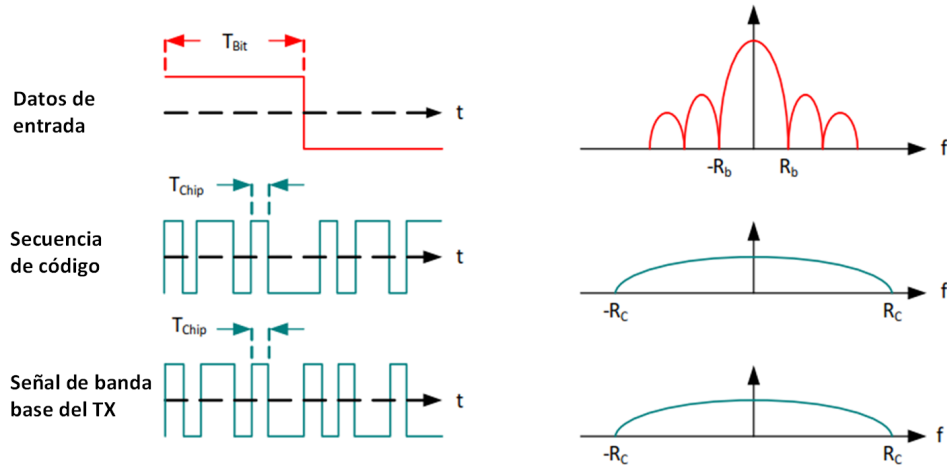


Figura 2.9: Proceso de modulación [6].

te es, utilizar la misma secuencia tanto en el receptor como en el transmisor para recuperar correctamente la información.

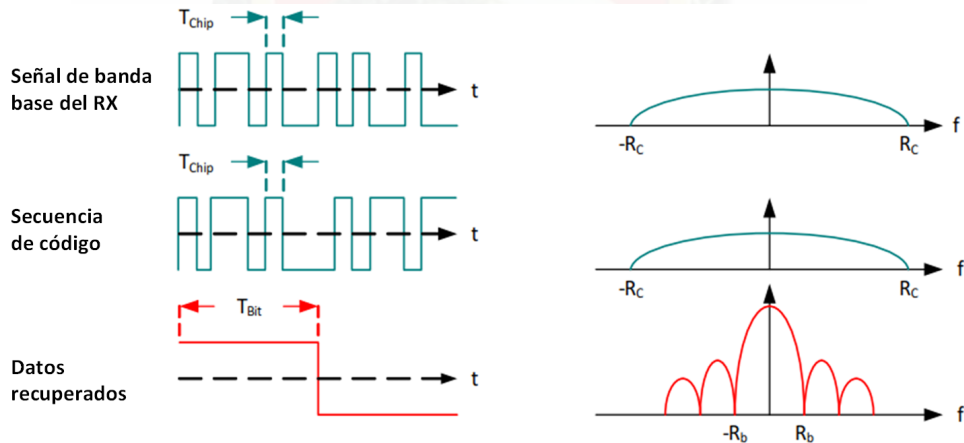


Figura 2.10: Proceso de demodulación [6].

2.8.2. Espectro ensanchado chirp (CSS)

CSS fue desarrollado para aplicaciones de radar en la década de 1940. Durante los últimos años, esta técnica de modulación ha visto una mayor adopción en una serie de aplicaciones de comunicaciones de datos debido a sus requisitos de potencia de transmisión relativamente bajos y la robustez inherente de los mecanismos de degradación del canal, tales como: multitrayectoria, desvanecimiento y doppler [6].

2.8.3. Modulación LoRa

La modulación LoRa de Semtech [37] aborda todos los problemas asociados con los sistemas DSSS. De este modo, proporciona una alternativa de bajo costo, bajo consumo energético y sobre todo robusta.

En este contexto, la modulación LoRa utiliza la técnica de corrección de errores hacia adelante (Forward Error Correction (FEC)) y espectro ensanchado para permitir mejoras significativas de SNR. Además, la propagación se logra generando una señal *chirp* que varía continuamente en frecuencia. Una ventaja de este método es que las compensaciones de tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, lo que reduce en gran medida la complejidad del diseño del receptor. Una importante característica, es que el BW de este *chirp* es equivalente al BW espectral de la señal [6]. Por último, la relación entre la tasa de bits deseada (R_b), la tasa de símbolos ($2^{SF}/BW$) y la tasa de chips ($4/4 + CR$) para la modulación LoRa se puede expresar como la Ecuación 2.9.

$$R_b = SF \times \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}}} \text{ (bps)} \quad (2.9)$$

Donde:

SF , factor de esparcimiento,

CR , tasa de datos,

BW , ancho de banda.

2.8.3.1. Características

La modulación LoRa tiene, entre otras, características como las más relevantes a la: escalabilidad, consumo energético, largo alcance y robustez a interferencia para aplicaciones de localización; las mismas que se detallan a continuación.

- **Ancho de banda escalable:** La modulación LoRa es escalable, tanto en BW como en frecuencia. Esto permite que pueda utilizarse tanto para aplicaciones de banda estrecha como de banda ancha. A diferencia de estos esquemas de modulación, LoRa se puede adaptar fácilmente para cualquiera de los modos de operación con solo pocos cambios en los registros de configuración de BW y SF [6].
- **Envoltorio constante y bajo consumo:** Similar a la modulación de frecuencia por desplazamiento (Frequency Shift Keying (FSK)), LoRa es un esquema de modulación de envoltorio constante, lo que significa que tiene bajo consumo de energía. Además, la potencia de salida del transmisor LoRa puede reducirse en comparación con un enlace FSK convencional mientras se mantiene el mismo o mejor presupuesto de enlace [6].

- **Capacidad de largo alcance:** El presupuesto de enlace de [LoRa](#) excede al de [FSK](#) convencional. En este contexto, puede traducirse fácilmente a 4 veces y más allá de la mejora en el alcance. Por lo tanto, mejora la robustez de los mecanismos en contra de interferencia y desvanecimiento [6].
- **Resistencia a desvanecimiento y multitrayectoria:** El pulso *chirp* es relativamente de banda ancha, por lo tanto, [LoRa](#) ofrece inmunidad a las fuentes de error de desvanecimiento y multitrayectoria. Esta resistencia lo hace ideal para entornos urbanos y suburbanos, en donde, ambas fuentes de error dominan [6].
- **Localización:** [LoRa](#) es la modulación ideal para aplicaciones de radiolocalización. Por lo tanto, es ideal para aplicaciones de localización como los servicios de localización en tiempo real [6].

2.8.4. Red de área amplia de largo alcance (LoRaWAN)

[LoRaWAN](#) es un protocolo de red que incluye funciones de capa de control de acceso al medio ([Media Access Control \(MAC\)](#)), de estándar abierto administrado por [LoRa Alliance](#) [46] destinada a la creación de [LPWANs](#) regionales y nacionales, debido a que, [LoRa](#) es una modulación inalámbrica para aplicaciones de largo alcance, baja potencia y baja tasa de datos, desarrollada por [Semtech](#) [37]. Los dispositivos [LoRaWAN](#) que implementan al menos la funcionalidad de clase A, generalmente se denominan “dispositivos finales de clase superior”, también implementan otras configuraciones como: clase B o C. Las redes [LoRaWAN](#) normalmente están dispuestas en una topología estrella en la que los *gateways* reciben mensajes de los dispositivos finales; y retransmiten a un servidor de red central. El servidor central de red enruta los paquetes de cada dispositivo de la red al servidor de aplicaciones asociado. Para asegurar las transmisiones de radio, el protocolo [LoRaWAN](#) se basa en la criptografía simétrica utilizando claves de sesión derivadas de las claves raíz del dispositivo [7].

2.8.4.1. Clases de LoRaWAN

Una red [LoRa](#) distingue entre una [LoRaWAN](#) básica (denominada clase A) y características opcionales: clase B o clase C (véase Figura 2.11).

- **Dispositivos terminales bidireccionales (clase A):** Los dispositivos finales de clase A permiten comunicaciones bidireccionales, por lo que, la transmisión del enlace ascendente de cada dispositivo final es seguida por dos ventanas cortas de recepción de enlace descendente. La ranura de transmisión programada por el dispositivo terminal se basa en una base de tiempo aleatorio (protocolo de tipo *ALOHA*). La operación de dispositivos finales en clase A es de menor potencia y para aplicaciones que solo requieren comunicación en enlace descendente desde el servidor poco después de que el dispositivo final haya enviado una transmisión de enlace ascendente. Las comunicaciones de enlace descendente

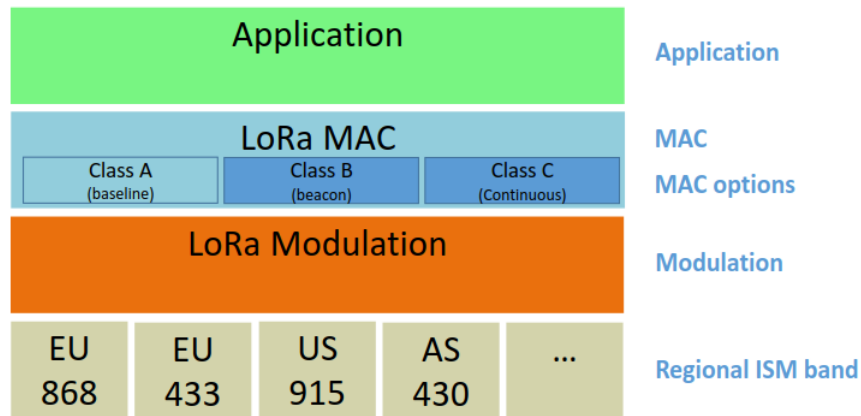


Figura 2.11: Clases de LoRaWAN [7].

desde el servidor en cualquier otro momento tendrán que esperar hasta el próximo enlace ascendente programado [7].

- **Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas (clase B):** Los dispositivos finales de clase B permiten más ranuras de recepción. Además de las ventanas de recepción de la clase A, los dispositivos de clase B abren ventanas de recepción adicionales en horarios programados. Para que el dispositivo final abra su ventana de recepción a la hora programada, recibe un *beacon* de sincronismo desde el *gateway* [7].
- **Dispositivos finales bidireccionales con máxima ranura de recepción (clase C):** Los dispositivos finales de la clase C tienen ventanas de recepción casi continuamente abiertas, solo cerradas cuando se transmite. El dispositivo terminal de clase C utiliza más potencia para operar, que la clase A o B, pero ofrece una latencia más baja para la comunicación del servidor al dispositivo final [7].

2.8.4.2. Activación del dispositivo final

Cada dispositivo final que desee unirse a una **LoRaWAN** tiene que ser personalizado y activado. La activación de un dispositivo final se realiza de dos maneras: vía activación por aire (**Over-The-Air Activation (OTAA)**) o vía activación por personalización (**Activation By Personalization (ABP)**).

- **Activación por aire (OTAA):** En **OTAA**, los dispositivos finales deben seguir un procedimiento de unión al servidor de red, antes de participar en el intercambio de datos. Los dispositivos finales no son personalizados con un par de claves de sesión de red. En cambio, cuando un dispositivo final se une a la red, las claves de sesión de red se calculan para encriptar y verificar las transmisiones a nivel de red. El dispositivo final configurado con **OTAA** debe realizar el procedimiento de unión cada vez que pierda la conexión con el

servidor, por lo tanto, estos dispositivos son los recomendados para aplicaciones con alta seguridad [7].

- **Activación por personalización (ABP):** En [ABP](#), las claves de sesión son directamente almacenadas en los dispositivos finales, en lugar de ser calculadas mediante un procedimiento de unión. Es decir, el dispositivo final debe estar equipado con la información necesaria para participar en una red [LoRa](#) al iniciar su funcionamiento. El dispositivo final configurado con [ABP](#) usa la misma clave de sesión durante todo su tiempo de vida, por lo tanto, estos dispositivos no se recomiendan para aplicaciones de alta seguridad [7].



Capítulo 3

Estado del arte

En este capítulo se presenta una recopilación de los principales trabajos de investigaciones y evaluaciones realizadas sobre sistemas de posicionamiento. Se han seleccionado trabajos que se basan tanto en tecnologías [LoRa](#) de gama alta, como de gama baja; y tecnologías diferentes, como: WiFi, [GSM](#), Zigbee y [GPS](#). Además, con el objetivo de homogeneizar el análisis, se presentan características relevantes como: dimensión de los escenarios, configuraciones [RF](#) y algoritmos de posicionamiento y localización utilizados. También, se propone una métrica que sirve para comparar todos los sistemas de posicionamiento descritos en esta sección.

3.1. Introducción

Antes de cubrir la necesidad de las personas de conocer su ubicación o la de objetos específicos, es importante conocer la estructura y funcionamiento de los [PSs](#) ya implementados. De esta manera, es indispensable analizar el comportamiento de los [PSs](#) con diferentes configuraciones de parámetros [RF](#), para escenarios interiores o exteriores.

Adicionalmente, debido a que no todos los trabajos analizados en esta sección presentan una forma homogénea de evaluar la exactitud de la estimación de la posición del objetivo. Se ha decidido definir una métrica nombrada como porcentaje de estimación basado en las dimensiones del escenario. Con el objetivo de eliminar el sesgo de comparación, ya que, no es lo mismo una exactitud promedio de estimación de la posición de 10m en un escenario de 100m, que en un escenario de 1 km con la misma exactitud promedio. Por ejemplo, para [PSs](#) con escenarios regulares de dimensión 500m×500m, se considera como 100% a la distancia máxima posible 707.11m que es la diagonal de este escenario regular. Si la exactitud promedio de estimación es 50m el porcentaje de estimación sería 7.07%. Es decir, el porcentaje de estimación de la posición se calcula mediante una regla de tres simple. Por otra parte, para [PSs](#) no regulares, se

considera como 100 % la distancia máxima posible del escenario, de extremo a extremo.

Por último, se presentan tablas comparativas sobre las ventajas y desventajas de los trabajos más relevantes, respecto a: exactitud de la estimación de la posición, arquitectura y tecnología utilizada en los PSs.

3.2. Sistemas de posicionamiento de gama alta

Actualmente, existen investigaciones de PSs que utilizan tecnologías con funciones de geolocalización incorporadas que evidentemente aumentan el costo de los equipos y se conocen como tecnologías de gama alta. En este contexto, los autores en [22] utilizan equipos de gama alta para el diseño e implementación de un PS, específicamente, una tarjeta *Waspote* como dispositivo final y 4 *gateways Kerlink* [38] de tecnología LoRa con GPS incorporado para sincronización. Además, utiliza el algoritmo de localización multilateración y posicionamiento TDoA incorporado en cada *gateway* para realizar la geolocalización. Por lo tanto, analizando los resultados del trabajo en un escenario exterior urbano de aproximadamente $2\text{ km} \times 3\text{ km}$, se tiene una exactitud promedio de 100 m correspondiente al 2.77 %. Por otra parte, con el objetivo de reducir el consumo energético, en [47] se propone un PS de rastreo de personas con nivel de demencia elevado. En este caso, las personas utilizan manillas con tecnología LoRa como dispositivos finales. Donde, se aumenta la vida de la batería de 10 horas en un PS basado en GPS a 18 días en un PS basado en tecnología LoRa y LoRaWAN en un escenario exterior urbano de aproximadamente $2\text{ km} \times 2\text{ km}$. Es decir, la tecnología LoRa elimina el alto consumo energético de PSs basados en la tecnología GPS.

Un grupo de trabajo conocido como LoRa Alliance [46] se ha encargado de recopilar trabajos relacionados a geolocalización para LPWANs usando tecnología LoRa o LoRaWAN [35]. Por ejemplo, un PS en [35] de Actility [48] y Cisco [36] utiliza la nueva generación de *gateways LoRaWAN*, que tienen incorporado el algoritmo de posicionamiento TDoA para aplicaciones rastreo. El PS tiene 6 *gateways IR829/IXM LoRaWAN* con una separación de entre 400 – 600 m en un escenario exterior suburbano de Barcelona. Además, necesita instalar el sistema *Abeway Master Trackers* en los vehículos en modo LoRaWAN para funcionar. En este contexto, analizando los resultados del trabajo y considerando una distancia máxima posible de 800 m entre *gateways*, el sistema obtiene una exactitud promedio de 60 – 80 m cuando el vehículo se encuentra estático, que corresponde al 8.75 % de porcentaje de estimación del sistema, y cuando el vehículo está en movimiento, el PS tiene una exactitud promedio de 170 m que corresponde al 21.25 %. Del mismo modo, en [35] un PS de Actility [48] y Cisco [36] tiene desplegado 5 *gateways IXM LoRaWAN* y un *Adeunis V2* como dispositivo final. Los *gateways* tienen una separación de entre 900 – 1300 m, con antenas a una altura entre 60 – 126 m en un escenario exterior urbano con dimensión de aproximadamente 1.6 km^2 . Finalmente, el PS tiene una exactitud de entre 75 – 115 m, por lo tanto, si se considera la distancia máxima posible de 1.5 km y una exactitud

promedio de 95 m, el porcentaje de estimación corresponde al 6.34 %.

También, en [35] un PS de *Semtech* [37] para un escenario exterior urbano consta de 6 *gateways* LoRaWAN y 30 dispositivos finales estacionarios. Los autores realizan pruebas con diferentes configuraciones de SFs: 7, 10 y 12. El rendimiento reportado del PS fue el mismo entre todas las configuraciones y analizando los resultados del trabajo se tiene una exactitud promedio de 150 m que corresponde al 5 % si se considera la distancia máxima posible de 3 km. Del mismo modo, en [35] un PS de *Semtech* [37] y *Kerlink* [38] se enfoca en la protección de animales, específicamente, rinocerontes negros de Tanzania en peligro de extinción. El PS consta de 4 *gateways* Kerlink [38] de tecnología LoRaWAN con una distancia entre ellos de entre 4 – 10 km, y un dispositivo final con interfaz LoRaWAN colocado en el rinoceronte, es decir, en un escenario exterior rural. Por otro lado, la exactitud obtenida por el PS oscila entre 20 – 50 m, por lo tanto, si se considera la distancia máxima posible de 7 km y una exactitud promedio de 70m, el porcentaje corresponde al 1 %. De igual manera, en [35] un PS de *Kerlink* [38] en un escenario exterior urbano de Francia, consta de 4 *gateways* *Wirnet IBTS* con funciones de geolocalización integradas. La exactitud reportada por el PS esta comprendida entre 30 – 60 m, por lo tanto, si se considera la distancia máxima posible de 3 km y exactitud promedio de 45 m, el porcentaje corresponde al 1.5 %.

Adicionalmente, en [49] se evalúa la exactitud del algoritmo TDoA incorporado en los equipos *gateway* mediante una aplicación que permite conocer la trayectoria del dispositivo final, ya sea, caminata, ciclismo, o automóvil. Los autores realizan diferentes configuraciones de SFs en escenarios exteriores urbanos sobre una LoRaWAN pública que tiene funcionalidades de geolocalización. La red consta con 6 dispositivos finales configurados con SFs de entre 7 – 12, únicamente transmiten datos al *gateway*. Por lo tanto, analizando los resultados del trabajo se tiene una exactitud promedio de 200 m, que corresponde al 2 % si se considera la distancia máxima posible de 10 km. Además, es importante destacar que la mejor configuración es con $SF = 12$. Finalmente, la Tabla 3.1 presenta un resumen de las ventajas y desventajas de los PSs de gama alta más relevantes.

3.3. Sistemas de posicionamiento de gama baja

En vista del continuo crecimiento de las tecnologías inalámbricas de bajo costo conocidas como tecnologías de gama baja, con características básicas para aplicaciones de localización como sensibilidad RSSI y mediciones de tiempo de baja resolución. Existen trabajos de PSs para escenarios exteriores aplicados a redes de área metropolitana (*Metropolitan Area Networks* (MANs)), que utilizan las tecnologías de bajo costo como: WiFi, Zigbee, GPS, entre otras.

Por ejemplo, en [50] un PS denominado *WiFi-only Outdoor Localization* (WOLoc) utiliza la alta densidad actual de puntos de acceso con infraestructura WiFi. El PS envía etiquetas de

Fuente	Ventaja	Desventaja
[22]	Utiliza tecnología LoRa de gama alta. Tiene una exactitud promedio de 100 m correspondiente al 2.77 % en un escenario exterior urbano de 2 km×3 km.	Cada nodo ancla es un <i>gateway</i> de gama alta con funciones de localización incorporadas, lo que eleva el costo de implementación del PS .
[47]	Utiliza tecnología LoRa , LoRaWAN y aumenta la vida útil de la batería de 10 horas usando GPS a 18 días en un escenario exterior urbano de 2 km×2 km.	Los nodos ancla deben tener relojes con precisión en el orden de los nanosegundos.
[35]	Utiliza tecnología LoRaWAN de gama alta para rastreo de vehículos. En estado estacionario tiene una exactitud promedio de 70 m correspondiente al 8.75 % en un escenario exterior suburbano con una distancia de separación máxima de 800 m.	La exactitud del sistema en movimiento es de 170 m en promedio correspondiente al 21.25 % en un escenario exterior suburbano con una distancia de separación máxima de 800 m.
[35]	Utiliza tecnología LoRaWAN de gama alta y tiene una exactitud promedio 95 m correspondiente al 6.34 % en un escenario exterior urbano de 1.6 km ²	Los nodos ancla son <i>gateways</i> de gama alta con precisión en el orden de los nanosegundos.
[35]	Utiliza tecnología LoRaWAN de gama alta y tiene una exactitud promedio 150 m correspondiente al 5 % en un escenario exterior urbano con una distancia de separación máxima de 3 km.	Los nodos ancla son <i>gateways</i> de gama alta con precisión en el orden de los nanosegundos.
[35]	Utiliza tecnología LoRaWAN de gama alta y tiene una exactitud promedio 70 m correspondiente al 1 % en un escenario exterior rural con una distancia de separación máxima de 7 km.	El porcentaje de estimación presentado por el PS es bajo porque el escenario es un parque nacional con LoS .
[35]	Utiliza tecnología LoRa de gama alta y tiene una exactitud promedio 45 m correspondiente al 1.5 % en un escenario exterior urbano con una distancia de separación máxima de 3 km.	Los resultados presentados son buenos debido a que los equipos de gama alta tienen funciones de geolocalización integradas.
[49]	Utiliza tecnología LoRaWAN de gama alta y tiene una exactitud promedio 200 m correspondiente al 2 % en un escenario exterior urbano con una distancia de separación máxima de 10 km; a una configuración con $SF = 12$.	Los equipos de gama alta requieren funciones de geolocalización integradas lo que eleva el costo de implementación del PS .

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de los PS de gama alta.

localización a la [MAN](#) para ayudar a localizar un nuevo usuario en la red. Los experimentos se realizan en 6 escenarios exteriores urbanos de dimensiones: 0.07, 0.14, 0.04, 0.07, 1.45 y 1.27 km²; con una cantidad promedio de 100 puntos de acceso en cada caso. El sistema presenta errores de localización de 5 – 15 m siempre y cuando la densidad de etiquetas de localización de los puntos de acceso sea alta de lo contrario el error aumenta.

Por otra parte, en [\[34\]](#) un [PS](#) evita el uso del [GPS](#) debido al bajo rendimiento en escenarios interiores. El trabajo propone un algoritmo de geolocalización para un [PS](#) con tecnología WiFi, y un conjunto de puntos de acceso con posiciones conocidas. El algoritmo utiliza la técnica de estimación de la posición denominada punto en triangulación aproximado ([Approximate Point In Triangle \(APIT\)](#)) comúnmente usada en escenarios interiores. La idea principal es crear una rejilla de cobertura y etiquetar cada rejilla de acuerdo a un nivel de [RSSI](#) proveniente de algún punto de acceso. Por lo tanto, la rejilla con el mejor nivel corresponde a la ubicación del objetivo. La desventaja de este algoritmo es que depende del mapeo del nivel de la señal, es decir, mientras más pequeña la rejilla, menor es el error de incertidumbre; y en escenarios exteriores la técnica [APIT](#) no es escalable.

Actualmente, los [PSs](#) usan el algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) debido a su bajo costo de implementación, pero este necesita de un modelo del canal de radio resultado de una previa caracterización del escenario de medición. En este contexto, en [\[21\]](#) se presenta un estudio sobre la factibilidad de la caracterización de canales [LoRa](#) para escenarios con ganado vacuno. Los autores utilizan como dispositivos finales *LoRaMote* y un *gateway LoRaWAN iC880A*. En resumen, este estudio demuestra que es posible utilizar [PLMs](#) para aplicaciones de [PSs](#). Del mismo modo, existe una gran cantidad de [WSNs](#) que necesitan características de geolocalización de bajo costo. Por tanto, en [\[23\]](#) se evalúa el comportamiento de los [PLMs](#) en las [WSNs](#). En este caso, se utiliza tecnología [GPS](#) para geolocalización y tecnología [LoRa](#) para comunicaciones inalámbricas de área amplia. El trabajo consta de múltiples nodos sensores *Dragino* [\[51\]](#) *LoRa Shield* de la plataforma *Arduino* que recolectan la información del [GPS](#) para enviar a la estación base *Intel Galileo Gen 2*. El trabajo evalúa [RSSIs](#) en la estación base; y como era de esperarse, el parámetro [RSSI](#) sigue un comportamiento logarítmico en función de la distancia. Finalmente, los resultados del trabajo demuestran alta confiabilidad del parámetro [RSSI](#) de los dispositivos [LoRa](#) para aplicaciones de [PSs](#) basados en [PLMs](#). Es importante destacar que cada sensor [RSSI](#) tiene un comportamiento diferente.

Por otra parte, en [\[52\]](#) un [PS](#) utiliza la sensibilidad [RSSI](#) incorporada en los dispositivos, para monitorear el comportamiento de tortugas en la India en un escenario exterior rural de 60 m×60 m con línea de vista; prescindiendo del uso de dispositivos [GPS](#). La propuesta utiliza equipos basados en tecnología Zigbee, 4 estaciones base *XBeePro* y un nodo objetivo *XBee* ubicado en la tortuga. Este sistema está basado en el algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) capturado en la estación base, y mediante el enfoque basado en cuadrícula incremental ([Incremental Grid Based Approach \(IGBA\)](#)), crea una matriz de valores basada en la información [RSSI](#) para

localizar al nodo objetivo. La propuesta únicamente presenta exactitud promedio de 3.2 m para la coordenada x y 4.3 m para la coordenada y , Por lo tanto, se analiza los resultados de la propuesta y se obtiene una exactitud promedio de 5.99 m, correspondiente al 7.06 %, considerando como 100 % a la máxima distancia de 84.85 m que es la diagonal del escenario regular. Del mismo modo, otros autores en [15] utilizan la sensibilidad **RSSI** y la característica **ToF** incorporada en los dispositivos con módulos *NXP JN5148* de tecnología Zigbee. El trabajo está conformado por 8 nodos ancla y 1 nodo objetivo y solo analiza el punto central del escenario de medición, que según las investigaciones es el punto con mejores resultados. Por lo tanto, analizando los resultados del trabajo se tiene una exactitud promedio de 0.89 m correspondiente al 7.20 % usando **RSSI** y 2.51 m correspondiente al 20.28 % usando **ToF** en un escenario interior de 10.55 m×22.48 m, y una exactitud promedio de 0.60 m correspondiente al 0.85 % usando **RSSI** y 1.98 m correspondiente al 2.80 % usando **ToF** en un escenario exterior rural de 50 m×50 m.

Por otro lado, existen también trabajos que realizan simulación de **PSs** con diferentes técnicas de localización aplicado a **WSNs**. En este contexto, para el caso de **RSSI** en [53] se reporta que para un incremento de 3 a 4 estaciones base, se tiene un efecto importante en la disminución del error de localización, pasando de 0.98 a 0.68 m en un área de 200 m². Después de 6 nodos el incremento del error no es significativo. La simulación indica que al aumentar la cantidad de nodos ancla se espera una reducción en el error de estimación de la posición.

Adicionalmente, usando una **WSN** en [54] se propone un nuevo método de estimación de la posición utilizando la información de valores **RSSI** en dos etapas importantes. Primero en un ambiente de medida antes de estar en línea, en el que los dispositivos *CC2530* de tecnología Zigbee realizan mediciones de la variable **RSSI** para crear una clasificación de las medidas con modelos estadísticos y solventar la incertidumbre en las mediciones. En segundo lugar se analiza un ambiente de medida en línea, en el que con nuevas mediciones de la variable **RSSI** se estima la distancia entre el nodo ancla y el nodo objetivo. Posteriormente, con esta información se estima la posición del objetivo mediante el algoritmo de localización trilateración. Por lo tanto, analizando los resultados del trabajo se tiene una exactitud promedio de 0.31 m correspondiente al 7.47 % en tres escenarios interiores ubicados en un pasillo, corredor y aire libre de 3 m×3 m.

Por otra parte, existen sistemas de posicionamiento que utilizan métodos híbridos para estimar la posición, por ejemplo, en [55] se utiliza **TDofA** y **ToA** para escenarios interiores de aproximadamente 25 m×30 m. El **PS** utiliza tres puntos de acceso, específicamente, un *Cisco* [36] *E4200*, un *Linksys WRT54GL* y un *Sony Vaio VPCYB2M1E*; en las bandas 2.4 GHz y 5 GHz en un escenario con **LoS**. El **PS** utiliza un método conocido como marcas de tiempo **MAC** para estimar la posición, con resolución de la marca de tiempo de 1 μ s. De esta manera, analizando los resultados del trabajo se tiene una exactitud promedio de 1.85 m correspondiente al 4.75 %. La desventaja de este trabajo es que requiere de dispositivos con buena resolución de tiempo. Finalmente, la Tabla 3.2 presenta un resumen de las ventajas y desventajas de los **PS** de gama baja más relevantes.

Fuente	Ventaja	Desventaja
[50]	Utiliza tecnología WiFi y tiene una exactitud promedio de 5 – 15 m en escenarios exteriores urbanos de dimensión 0.04 – 1.45 km ² . Ocupa la alta densidad de puntos de acceso actual.	Depende de una alta densidad de puntos de acceso que envíen etiquetas de localización a la red. Al aumentarlos, aumentan las etiquetas, por lo tanto la saturación de la red.
[34]	Utiliza tecnología WiFi para escenarios interiores. Propone un algoritmo que utiliza la técnica de estimación de la posición APIT.	Depende del mapeo del nivel de señal, es decir, mientras más pequeña la rejilla, menor es el error de incertidumbre. No aplicable para escenarios exteriores.
[21, 23]	Utilizan tecnología LoRa de bajo costo. Demuestra que es factible utilizar PLMs y combatir problemas de desvanecimiento de canal.	Cada enlace entre nodo ancla y nodo objetivo tiene un comportamiento diferente. Es necesario un PLM por enlace de comunicación.
[52]	Utiliza tecnología Zigbee en un escenario exterior rural de dimensión 60 m×60 m, tiene una exactitud de 5.99 m correspondiente al 7.06 %.	Utiliza la técnica IGBA comúnmente utilizada en escenarios interiores que crea una matriz de valores RSSI del escenario.
[15]	Utiliza tecnología Zigbee. Tiene una exactitud promedio de 0.89 m correspondiente al 7.20 % usando RSSI y 2.51 m correspondiente al 20.28 % usando ToF en un escenario interior de 10.55 m×22.48 m, y una exactitud promedio de 0.60 m correspondiente al 0.85 % usando RSSI y 1.98 m correspondiente al 2.80 % usando ToF en un escenario exterior rural de 50 m×50 m.	Solo analiza un punto de prueba ubicado en el centro del escenario de medición que según las investigaciones es el punto que proporciona los mejores resultados. Además, utiliza 8 nodos ancla que reducen el error de estimación pero aumenta el costo computacional respecto al tiempo de procesamiento.
[54]	Utiliza tecnología Zigbee y tiene una exactitud promedio de 0.31 m correspondiente al 7.47 % en tres escenarios interiores ubicados en un pasillo, corredor y aire libre de 3 m×3 m.	Depende de una etapa previa de reconocimiento de los escenarios y este procedimiento no es escalable a escenarios exteriores.
[33]	Utiliza tecnología GSM y GPS en escenarios interiores.	Depende de la limitada cobertura en interiores de las tecnologías GSM y GPS
[55]	Utiliza tecnología WiFi para escenarios interiores de 25 m×30 m y tiene una exactitud de 1.85 m correspondiente al 4.75 %.	Requiere dispositivos con buena resolución de tiempo.

Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de los PS de gama baja.

3.4. Conclusiones

De acuerdo a la Tabla 3.1 que presenta las características principales de los PSs con tecnologías de gama alta. Es evidente que el porcentaje de estimación oscila entre 1–8 % aproximadamente a pesar del alto costo de diseño e implementación de estos PSs. En conclusión, se debe implementar equipos de gama alta cuando los escenarios de medición tengan separaciones entre nodos ancla en el orden de kilómetros. Además, como usan equipos de gama alta estiman la posición de los nodos objetivos basándose en información de las funciones de geolocalización incorporadas en los equipos o con tecnología GPS externa conectada a los equipos; tienen desventajas en lo que se refiere a la escalabilidad de la red debido al alto consumo energético del GPS y el costo más elevado de implementación.

En este contexto, existen trabajos que analizan el comportamiento de tecnologías alternativas al GPS, como: WiFi, Zigbee, GSM y LoRa. Se ha podido observar que las tecnologías WiFi y Zigbee presentan mejores resultados en escenarios interiores cuando no utilizan dispositivos con tecnología GPS. Sin embargo, cuando utilizan dispositivos con tecnología GPS generalmente se enfocan en escenarios exteriores. Por su parte, la tecnología LoRa cuenta con *gateways* de gama alta que tienen incorporado características de geolocalización, como: reloj con precisión en nanosegundos, receptor GPS y algoritmo de posicionamiento TDoA. Los PSs que utilizan *gateways* de gama alta se enfocan en escenarios exteriores.

Como los equipos de gama alta tienen costos en el orden de miles de dolares, dependiendo de la cantidad de funciones incorporadas que se desee. Para PSs en escenarios de medición que tengan separaciones entre nodos ancla inferiores a kilómetros, es suficiente implementar equipos de gama baja para solventar el problema de costo de implementación. Además, como se observa en la Tabla 3.2 que presenta las características principales de los PSs con tecnologías de gama baja. Es evidente que el porcentaje de estimación oscila entre 4 – 8 % aproximadamente, similar a los resultados de gama alta, a pesar del bajo costo de diseño e implementación de estos PSs. En resumen, estos sistemas se basan en la sensibilidad RSSI de los dispositivos. La desventaja de esta clase de sistemas es la necesidad de PLMs del escenario de medición. Es decir, los resultados dependen de la sensibilidad RSSI de los equipos utilizados. Por lo tanto, estos sistemas de bajo costo son susceptibles a errores de incertidumbre.

Capítulo 4

Diseño e implementación de un sistema de posicionamiento basado en tecnología LoRa

En este capítulo se presenta la descripción técnica de los equipos disponibles con tecnología [LoRa](#), con el objetivo de identificar las limitaciones en los algoritmos de posicionamiento y localización utilizados para el funcionamiento del sistema de posicionamiento. En primer lugar, se analizan algunos factores importantes en el diseño del [PS](#), como: arquitectura; factibilidad de los dispositivos con tecnología [LoRa](#) que actúan como nodo objetivo o nodos ancla; disposición de los equipos mediante el diseño de las tarjetas de circuito impreso ([Printed Circuit Boards \(PCBs\)](#)). Adicionalmente se analizan los algoritmos de programación para el nodo objetivo y nodos ancla, necesarios para la implementación del [PS](#).

4.1. Introducción

Durante los últimos años hemos visto una demanda creciente de servicios y sistemas que dependen de la ubicación específica de personas y diferentes tipos de dispositivos. Existen numerosas tecnologías que brindan características [RF](#) adecuadas para la implementación de un sistema de posicionamiento. En este contexto, para diseñar e implementar un [PS](#) es necesario conocer la factibilidad de los dispositivos disponibles, con el objetivo de analizar sus características [RF](#) más relevantes y definir el algoritmo de posicionamiento y localización adecuado. Por ejemplo: si los dispositivos tienen relojes de alta calidad y resolución, es conveniente utilizar algoritmos como el [ToA](#) y [TDoA](#). Por otra parte, si hay disponibilidad de arreglos de antenas inteligentes

debería usarse [AoA](#). En cambio, si los dispositivos tienen buena sensibilidad en los sensores de la intensidad de señal se utilizaría el método basado en [RSSI](#). Adicionalmente el algoritmo de localización se deriva del algoritmo de posicionamiento.

Además, es importante analizar la arquitectura y subsistemas involucrados en el funcionamiento del [PS](#), con la finalidad de identificar los protocolos de comunicación necesarios y definir los algoritmos de programación para el nodo objetivo y nodos ancla, necesarios para la implementación del [PS](#).

4.2. Diseño del sistema de posicionamiento

Para diseñar el [PS](#) con tecnología [LoRa](#) es necesario conocer los requerimientos mínimos de funcionamiento de los dispositivos [FiPy](#) y [LoPy](#) disponibles. Por ejemplo: características [RF](#), resolución del reloj en tiempo real ([Real Time Clock \(RTC\)](#)) y sensibilidad [RSSI](#). Esto, con la finalidad de establecer limitaciones respecto a los escenarios de medición, algoritmos de posicionamiento y localización necesarios para el funcionamiento del sistema.

4.2.1. Requerimientos del sistema de posicionamiento

El [PS](#) tiene algunos requerimientos mínimos de diseño, relacionado a aspectos como: escenarios de medición, limitaciones con los algoritmos de posicionamiento y localización. Por lo tanto, en la Tabla 4.1 se muestra detalladamente los requerimientos y limitaciones del [PS](#) con dispositivos de tecnología [LoRa](#) de bajo costo [FiPy](#) o [LoPy](#) utilizados y evaluados en el presente trabajo.

4.2.2. Descripción y disposición de dispositivos [LoRa](#)

En esta sección se describen las características de los dispositivos disponibles para implementar el [PS](#). Además, se indica la distribución en la red, destacando las características más relevantes.

4.2.2.1. Descripción de los equipos [LoRa](#)

El Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca dispone de placas de desarrollo con tecnología [LoRa](#), específicamente, dispositivos del fabricante [Pycom](#) [56] [FiPy](#) y [LoPy](#) en sus versiones 1.0 y 4.0. Estos dispositivos disponen de características útiles para implementar un sistema de posicionamiento, como: [RTC](#) en el orden de los microsegundos, sensibilidad [RSSI](#) variable en función de la configuración de ancho de banda y factor de espaciamiento. En este contexto, en la Tabla 4.2 se muestra un resumen del Apéndice C, que detalla las características relevantes de los dispositivos [FiPy](#) y [LoPy](#). Por otra

Requerimiento	Descripción
Escenario	Requiere enlaces de comunicación sin fuentes de error como: desvanecimiento multitrayectoria o propagación NLoS (véase Sección 2.6.3).
Algoritmos de posicionamiento	ToA : Requiere sincronización entre nodos ancla y nodo objetivo en el orden de nanosegundos. TDoA : Requiere sincronización entre nodos ancla en el orden de nanosegundos. RSSI : Requiere sensor RSSI de buena calidad y depende de la sensibilidad de las placas de desarrollo. AoA : Requiere de arreglo de antenas inteligentes en todos los nodos ancla (véase Sección 2.3).
Algoritmos de localización	Trilateración : Requiere el mínimo error en la estimación de la distancia entre el nodo objetivo y el nodo ancla. Triangulación : Requiere antenas inteligentes en los nodos ancla para detectar el ángulo de la señal incidente proveniente del nodo objetivo. Multilateración : Requiere sincronización en todos los nodos ancla (véase Sección 2.4).
Banda de frecuencias	El PS requiere operar en las bandas ISM, específicamente para Ecuador, en la banda 915 MHz (véase Apéndice B).

Tabla 4.1: Requerimientos del sistema de posicionamiento, Secciones 2.6.3, 2.3, 2.4 y Apéndice B.

parte, la Tabla 4.3 muestra la sensibilidad RSSI de los dispositivos FiPy y LoPy, para algunas configuraciones de BW y SF.

4.2.2.2. Módulos de control del sistema de posicionamiento

En el presente trabajo se asume que el PS necesita que los dispositivos FiPy o LoPy tengan autonomía energética y portabilidad. Por lo tanto, se requiere diseñar una placa de circuito impreso de control para el nodo objetivo y los nodos ancla. En este contexto, la Figura 4.1 muestra las consideraciones de diseño del PCB de control (véase Apéndice D) dividida en dos partes importantes. En primer lugar, los dispositivos FiPy o LoPy que actúan como cerebro. En segundo lugar, las entradas digitales, puertos especiales de configuración LoRa y cada una de las consideraciones de diseño se describe en la Tabla 4.4.

4.2.2.3. Características de los dispositivos FiPy y LoPy

Para implementar los algoritmos de posicionamiento ToA y TDoA en el sistema de posicionamiento, es necesario que los dispositivos FiPy y LoPy tengan muy buena precisión en la medición del tiempo de retardo de ida y vuelta (Round-Trip Delay Time (RTT)). En cambio,

Características	FiPy	LoPy 1.0	LoPy 4.0
RTC (kHz)	150	150	150
Bandas ISM (MHz)	868, y 915	868, y 915	433, 915, y 868
T_x LoRa (mA)	156	92.6	108
Punto de acceso WiFi (mA)	126	96.5	104
Cliente WiFi (mA)	137	107.3	99
Bluetooth (mA)	121	94	97.5
Chip Semtech [37]	SX1272	SX1272	SX1276
Rango (MHz)	860 – 1020	860 – 1020	137 – 1020
SF	6 – 12	6 – 12	6 – 12
BW (kHz)	125 – 500	125 – 500	7.8 – 500
Tasa de bits (kbps)	0.24 – 37.5	0.24 – 37.5	0.018 – 37.5
Sensibilidad RSSI (dBm)	–117 a –137	–117 a –137	–111 a –148

Tabla 4.2: Características relevantes de dispositivos FiPy y LoPy, Apéndice C.

Configuración BW (kHz) y SF	FiPy (dBm)	LoPy 1.0 (dBm)	LoPy 4.0 (dBm)
125 y 6	–122	–121	–118
125 y 12	–137	–137	–136
250 y 6	–119	–118	–115
250 y 12	–134	–135	–133
500 y 6	–116	–111	–111
500 y 12	–131	–129	–130

Tabla 4.3: Sensibilidad RSSI de los dispositivos FiPy y LoPy, Apéndice C.

para implementar el algoritmo de posicionamiento RSSI, es necesario definir la mejor configuración de parámetros de modulación LoRa, específicamente: potencia de transmisión (P_{TX}), ancho de banda y factor de esparcimiento.

- **Medición del RTT:** Los dispositivos FiPy o LoPy permiten medir su RTT de tres formas distintas a través de: (1) Tiempo de instrucción o de ciclo, (2) Reloj en tiempo real y (3) Función de cronómetro incorporada. En este contexto, se procedió a evaluar experimentalmente el RTT en un enlace de comunicación entre el nodo ancla y el nodo objetivo, a distancias de 15 m, 2.6 km y 10 km respectivamente. El objetivo fue evaluar cada uno de los tres enfoques bajo tres escenarios distintos ilustrados en las Figuras 4.2a, 4.2b y 4.2c.

La evaluación se llevó a cabo por medio de dos dispositivos, un transmisor LoPy 1.0 con identificador 7fee y un receptor FiPy con identificador f1e0. El transmisor es el encargado de evaluar cada uno de los tres enfoques de medición del RTT. Cada evaluación consiste en enviar un mensaje desde el equipo transmisor, luego el equipo receptor refleja este mensaje y finalmente en el equipo transmisor se recibe el reflejo y se calcula la diferencia de tiempo. La Figura 4.3 muestra el resultado de evaluar el RTT alrededor de 1000 veces para la distancia cercada, alrededor de 200 veces para la distancia mediana y alrededor de 20 veces para la distancia lejana a intervalos de un segundo entre mediciones. Además,

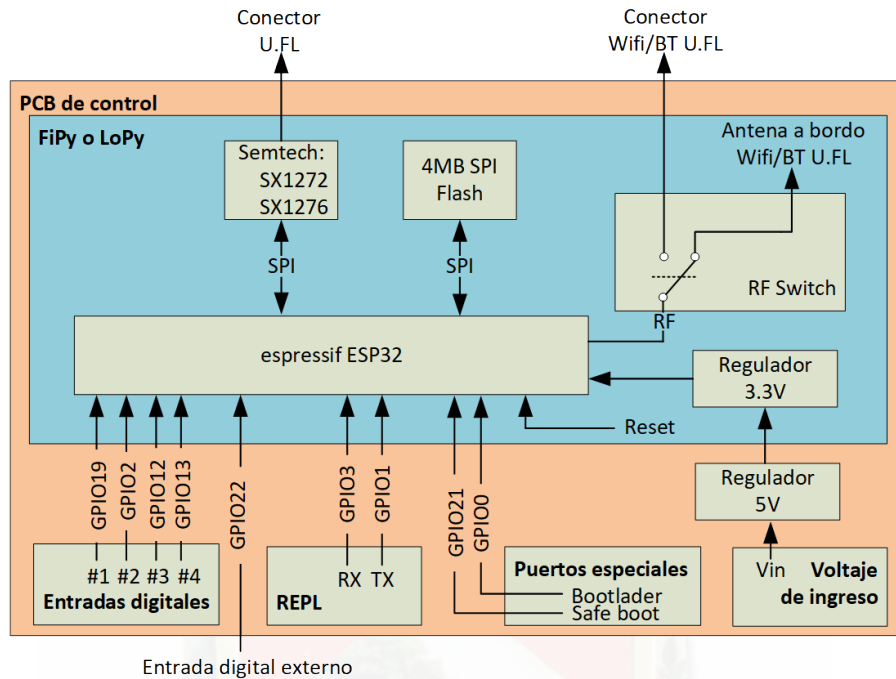


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la placa del circuito impreso de control.

se utiliza el intervalo de confianza del 95 % aplicado al conjunto de mediciones, con el objetivo de conocer la variación de las mediciones en cada enfoque y a cada distancia. En este contexto, se observa que no hay variación significativa de tiempo a distancias cercanas, medianas y lejanas. Esto se debe principalmente a que la precisión de los relojes está en el orden de los microsegundos y son necesarios nanosegundos. Resulta, por tanto, imposible utilizar cualquier enfoque de medición del **RTT** en los dispositivos FiPy o LoPy disponibles para estimar la distancia entre nodo ancla y nodo objetivo. Con estas premisas, para estos dispositivos específicamente, se descarta la posibilidad de implementar los algoritmos de posicionamiento **ToA** y **TDoA**. Además

- **Mediciones RSSI:** Los dispositivos FiPy o LoPy permiten configurar las características RF de la modulación LoRa como: potencia de transmisión, ancho de banda, y factor de espaciamiento. Como es de esperarse, adicionalmente diferentes configuraciones de BW y SF cambian la sensibilidad RSSI de los dispositivos de acuerdo a lo reportado en la Tabla 4.3. Por lo tanto, es necesario evaluar el rango dinámico de la variable RSSI en los dispositivos con los que se van a trabajar en la presente propuesta. En este contexto, la Figura 4.4 muestra la configuración del escenario de pruebas con la disposición de los equipos para determinar el rango dinámico de la variable RSSI.

La prueba controlada en campo, consiste en establecer un enlace de comunicación entre un transmisor y un receptor. El transmisor es un nodo LoPy 1.0 que en este caso tiene un

Parámetros	Descripción
Voltaje continuo	Para el correcto funcionamiento del módulo de control, se requiere un puerto de alimentación con voltaje continuo.
Regulador de tensión	Como existen diversos tipos de baterías, con diferentes capacidades de voltaje de entrega; se requiere regular la tensión a la entrada de los dispositivos FiPy y LoPy en 5 V.
REPL	El bucle de lectura-evaluación-impresión (Read-Eval-Print-Loop (REPL)) es un interfaz de programación que permite al usuario interactuar con el dispositivo FiPy o LoPy, para cargar y ejecutar los programas.
Entradas digitales	Permiten interactuar con los dispositivos FiPy o LoPy, es decir, activar o desactivar la configuración como servidor de protocolo de transferencia de archivos (File Transfer Protocol (FTP)), iniciar el algoritmo de captura de datos RSSI y cambiar entre diferentes configuraciones de parámetros RF de la modulación LoRa .
<i>Bootloader</i>	Configuración necesaria para actualizar el <i>firmware</i> de los dispositivos FiPy o LoPy.
<i>Safe boot</i>	Configuración necesaria para deshabilitar la ejecución del programa y ejecutar directamente el REPL cuando se producen malos comportamientos.

Tabla 4.4: Consideraciones de diseño del PCB control.

identificador *7fee*. Este transmisor está conectado a un atenuador variable *HEWLETT PACKARD* modelo *8496B* con resolución de 1 dB desde 1 – 121 dB, con el propósito de controlar la atenuación de la potencia de transmisión, cuyo efecto se refleja en la medición del [RSSI](#) en el receptor. Por su parte, el receptor también es un nodo LoPy 1.0 con identificador *6d08*. El objetivo principal de esta prueba es emular escenarios de distancias cercana, mediana y lejana se elige una separación entre transmisor y receptor de 10 m, 30 m y 50 m respectivamente. En este contexto, cada distancia tiene un conjunto de mediciones producidas al variar el atenuador variable desde 0 dB hasta 50 dB de atenuación con saltos de 5 dB (véase Figura 4.5).

Además, la prueba busca predecir el comportamiento de la sensibilidad [RSSI](#) de los dispositivos con tecnología [LoRa](#) bajo diversas configuraciones de potencia de transmisión, ancho de banda y factor de esparcimiento. Por lo tanto, se ha realizado la evaluación con 2 configuraciones diferentes de [BW](#). Específicamente la primera prueba realizada con la configuración de [BW](#) = 500 kHz y [SF](#) = 12 (Figura 4.5a) evidencia que existe diferencia significativa en el comportamiento del [RSSI](#), donde, se observa una no linealidad al atenuar más de 30 dB, lo que indica que el rango dinámico de los dispositivos es aceptable hasta los 30 dB de atenuación. Por otra parte, la segunda configuración del sistema con [BW](#) = 125 kHz y [SF](#) = 7 (Figura 4.5b) presenta un comportamiento caótico en el que no se puede identificar un rango dinámico. Por lo tanto, esta configuración no permite una buena caracterización del enlace entre transmisor y receptor, información necesaria

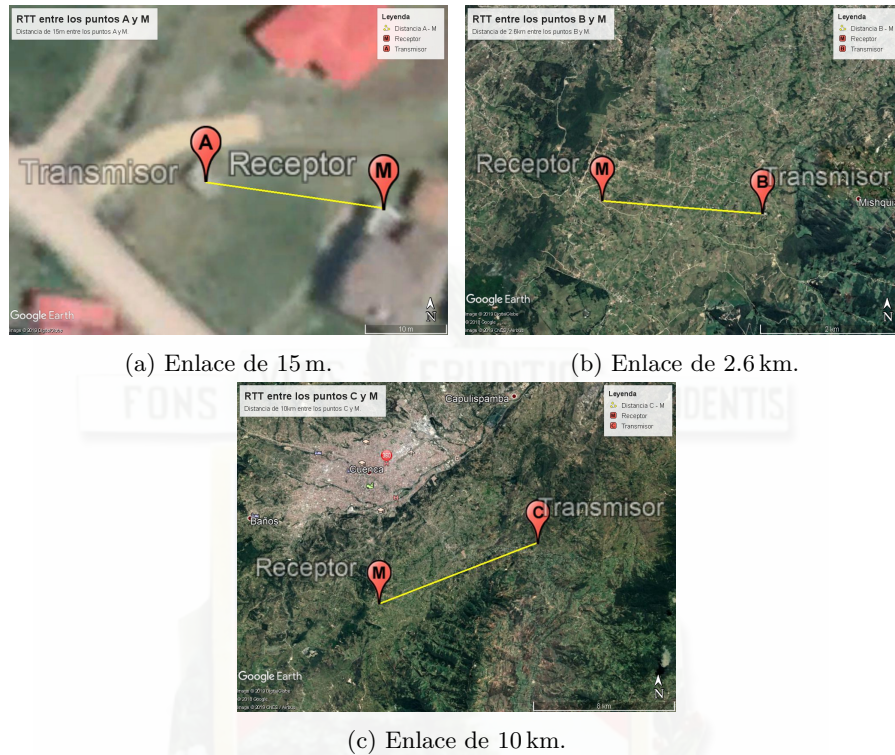


Figura 4.2: Escenarios de evaluación para las distancias cercana, mediana y lejana.

para el funcionamiento del **PS**. En base a los resultados expuestos en las Figuras 4.5a y 4.5b se concluye que la configuración de la modulación **LoRa** de $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm al tener un rango dinámico aceptable es la indicada para estimar la caracterización del enlace entre el transmisor y receptor correctamente mediante las mediciones del **RSSI**.

4.2.2.4. Disposición de dispositivos FiPy o LoPy

Las pruebas controladas realizadas en entorno ambiental presentadas en la Sección 4.2.2.3 bajo diferentes distancias entre el transmisor y receptor, muestran la necesidad de la autonomía de las placas de circuito impreso de control. En este contexto, cada dispositivo del sistema de posicionamiento cuenta con una batería recargable y para resistir los cambios climáticos cuenta con una caja plástica. Además, para cumplir con la portabilidad necesaria se coloca en un trípode a una altura de 1.5 m sobre el suelo, que es la altura que se recomienda para mediciones **RSSI** (véase Figura 4.6).

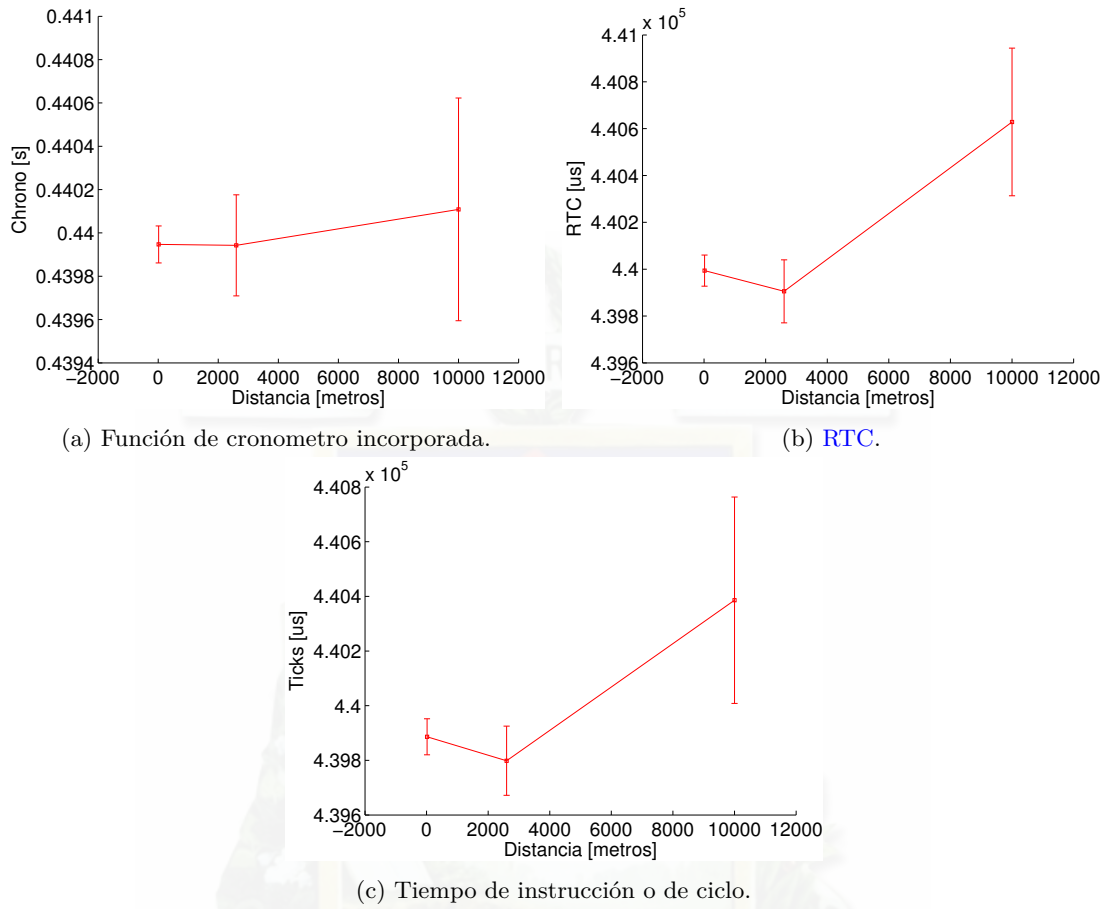
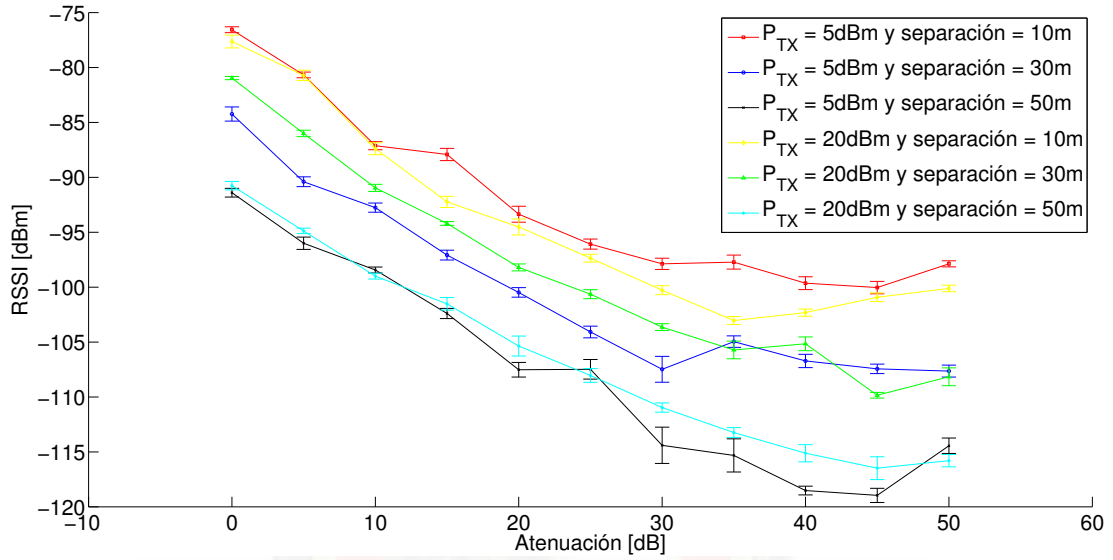


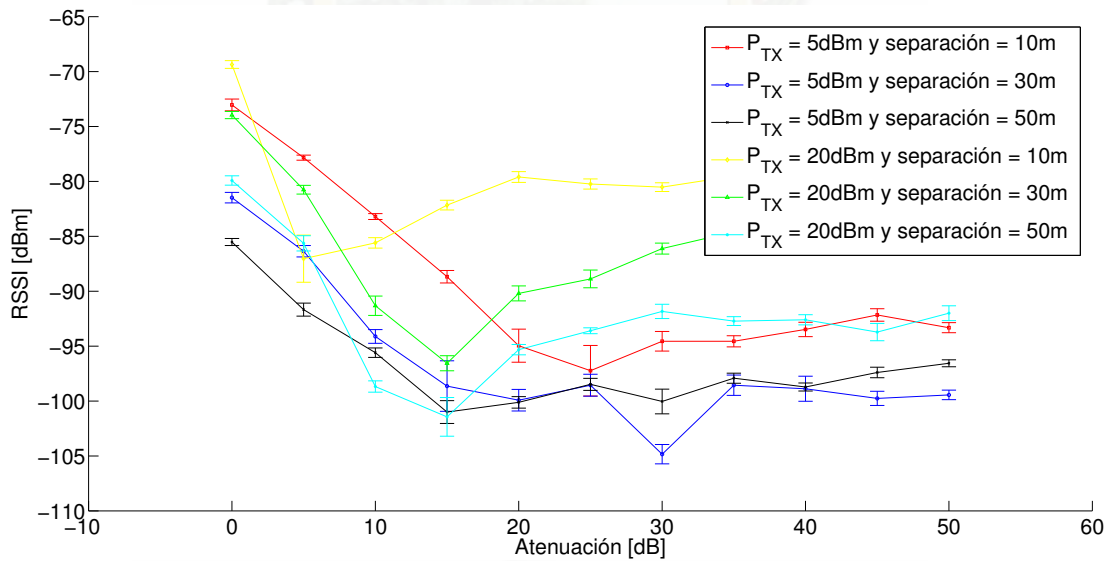
Figura 4.3: Resultados de evaluar los tres enfoques de medición del RTT a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 20$ dBm.



Figura 4.4: Disposición de los equipos para pruebas del rango dinámico de la variable RSSI.



(a) Prueba 1: $BW = 500\text{ kHz}$ y $SF = 12$.



(b) Prueba 2: $BW = 125\text{ kHz}$ y $SF = 12$.

Figura 4.5: Pruebas controladas en campo con atenuador variable de enlace entre transmisor 7fee y receptor 6d08.



Figura 4.6: Disposición de dispositivos FiPy o LoPy.

4.2.3. Selección de algoritmos de posicionamiento y localización

De acuerdo a los requerimientos del sistema de posicionamiento de la Tabla 4.1 se analiza la factibilidad de implementar cada uno de los algoritmos de posicionamiento y localización considerando las características específicas de los dispositivos FiPy o LoPy del fabricante Pycom [56] disponibles.

4.2.3.1. Algoritmos de posicionamiento

Como se ha mencionado anteriormente, para los algoritmos de posicionamiento **ToA** y **TDoA** se requiere que la medición de los tiempos de retardo de ida y vuelta en los dispositivos FiPy y LoPy esté en el orden de los nanosegundos. A partir de los resultados de las pruebas de la Sección 4.2.2.3 se comprobó que no es factible alcanzar dichos requisitos en estos dispositivos, ya que los resultados evidencian una resolución en microsegundos (Sección 4.2.2.1). Por lo tanto, no es posible implementar los algoritmos **ToA** y **TDoA** debido a las características de tiempo de los dispositivos FiPy y LoPy disponibles.

Por otra parte, el algoritmo de posicionamiento **AoA** requiere de arreglo de antenas inteligentes en los nodos ancla; y por lo tanto, no es factible implementar este algoritmo debido a que no se cuenta con tales arreglos de antenas inteligentes en los nodos ancla.

Finalmente, el algoritmo de posicionamiento **RSSI** necesita capacidades de medición de potencia incorporadas en los dispositivos FiPy y LoPy. Además, en base a las mediciones **RSSI** evaluadas en la sección 4.2.2.3, se concluye que es factible implementar el sistema de posicionamiento basado en **RSSI** con dichos dispositivos.

4.2.3.2. Algoritmos de localización

Los algoritmos de localización multilateración y triangulación no son factibles debido a los problemas presentados en la Sección 4.2.3.1 sobre los algoritmos de posicionamiento TDoA y AoA respectivamente, ya que, los dispositivos no cuentan con una buena resolución en la medida del tiempo y no se cuenta con arreglo de antenas inteligentes. Por otra parte, existen 2 enfoques para la implementación del algoritmo de trilateración. En primer lugar, el enfoque del algoritmo de posicionamiento ToA, el cual, no es factible por los problemas de medición de tiempo presentado en la Sección 4.2.3.1. En segundo lugar, el enfoque del algoritmo de posicionamiento RSSI, el cual, presenta factibilidad de la implementación del algoritmo debido a las afirmaciones presentadas en la Sección 4.2.2.3 sobre la posibilidad de caracterizar el enlace entre en transmisor y receptor.

4.2.4. Fuentes de incertidumbre en el sistema de posicionamiento

Un sistema de posicionamiento basado en la variable RSSI tiene muchas fuentes de incertidumbre que afectan las mediciones. Esto se debe principalmente a la influencia de factores ambientales, que causan problemas de radio frecuencia como: orientación de las antenas, variabilidad en la potencia de transmisión, variabilidad en la sensibilidad RSSI, entre otros. En este contexto, la Tabla 4.5 describe las posibles fuentes de incertidumbre que afectan al PS [57].

4.2.5. Escenarios de evaluación

En base a las consideraciones de las secciones anteriores, el único algoritmo de posicionamiento factible para implementarse en los dispositivos disponibles es el basado en mediciones RSSI debido a las características de los equipos FiPy y LoPy de bajo costo. En este trabajo se propone evaluar el comportamiento de la variable RSSI en escenarios tanto urbanos como rurales con línea de vista para determinar el desempeño del sistema en diferentes entornos.

4.2.5.1. Descripción de los escenarios

Es necesario evaluar el comportamiento de la variable RSSI en diversos escenarios, con el objetivo de identificar en que escenarios se obtienen resultados estables y confiables de la caracterización del PLM utilizada para estimar la ubicación del nodo objetivo en el sistema de posicionamiento. En este contexto, la Tabla 4.6 muestra la descripción de los escenarios de medición, en entornos urbanos y rurales con línea de vista. Además, la Figura 4.7 ilustra cada uno de los escenarios mencionados.

Fuentes	Descripción
Factores ambientales	Las mediciones de la variable RSSI pueden variar por factores meteorológicas, es decir, podría ser distinto si el día es nublado, soleado o lluvioso.
Orientación de las antenas	Cada antena tiene su propio patrón de radiación que no es uniforme, por tanto, un enlace de comunicación entre el nodo ancla y el nodo objetivo puede variar la medición del RSSI en función del cambio en la orientación de las antenas del transmisor y receptor.
Variabilidad en la potencia de transmisión	En base a las evaluaciones experimentales realizadas en el Apéndice E, se puede afirmar que, los dispositivos FiPy y LoPy versión 1.0 bajo la misma configuración LoRa a una misma P_{TX} tienen diferentes comportamientos en sus potencias de transmisión reales. Por lo tanto, las mediciones del RSSI pueden sufrir alteraciones debido a su naturaleza interna de fabricación.
Variabilidad en la sensibilidad RSSI	Los dispositivos FiPy y LoPy, entre sí, tienen diferentes comportamientos en su sensibilidad RSSI bajo mismos parámetros de configuración en la modulación LoRa.
Ruido electromagnético	Si existen muchos transmisores operando a la misma frecuencia en el área de medición pueden influenciar en las mediciones de la variable RSSI.
Resolución finita de los sensores RSSI	Los sensores RSSI actuales tienen resolución finita, es decir, valores enteros en unidades de dBm, por lo tanto introducen ruido de cuantización en la medición.
Nivel de batería	La sensibilidad RSSI sufre alteraciones cuando el estado de la batería de alimentación es inferior al requerido para el correcto funcionamiento de los dispositivos FiPy o LoPy que es de 5 V.

Tabla 4.5: Descripción de las fuentes de incertidumbre.

Entorno	Descripción
Urbano	Escenario 1: Cancha de fútbol de la Universidad de Cuenca ($24^{\circ}7.63'S$; $79^{\circ}41.20'O$); el terreno es plano con LoS total y con dimensiones de $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ aproximadamente.
Rural	Escenario 2: Meseta de Pachamama de la ciudad de Cuenca ($29^{\circ}58.72'S$; $78^{\circ}54.75'O$); es un terreno plano con LoS total y con dimensiones de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ aproximadamente. Escenario 3: Granja Irquis de la Universidad de Cuenca ($3^{\circ}49.20'S$; $79^{\circ}31.26'O$); es un terreno plano con LoS total y con dimensiones de $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ aproximadamente.

Tabla 4.6: Descripción de los escenarios.

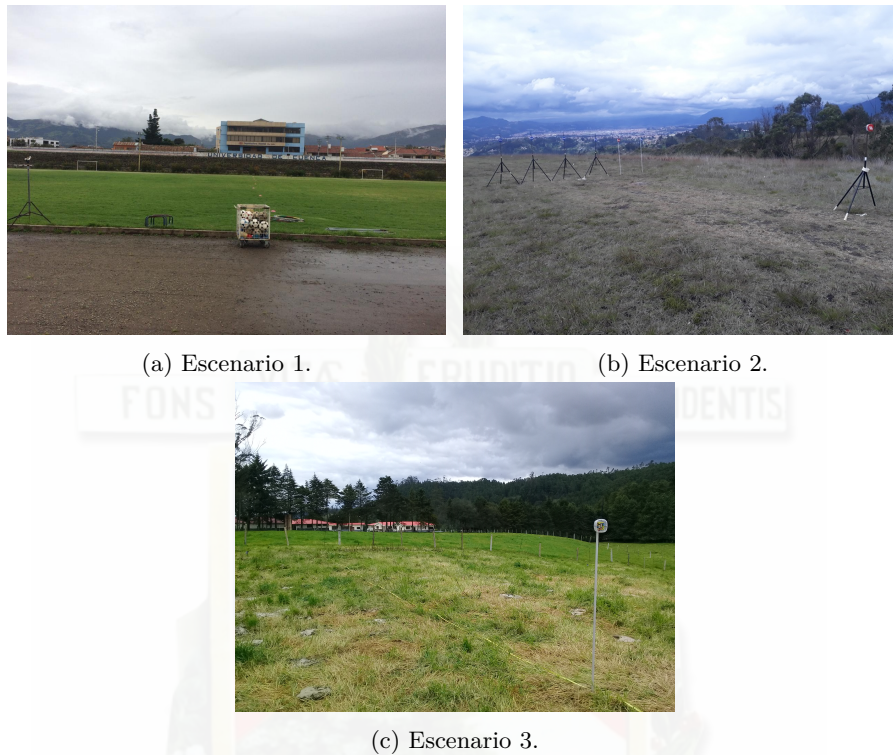


Figura 4.7: Escenarios de evaluación para las distancias cercana, mediana y lejana.

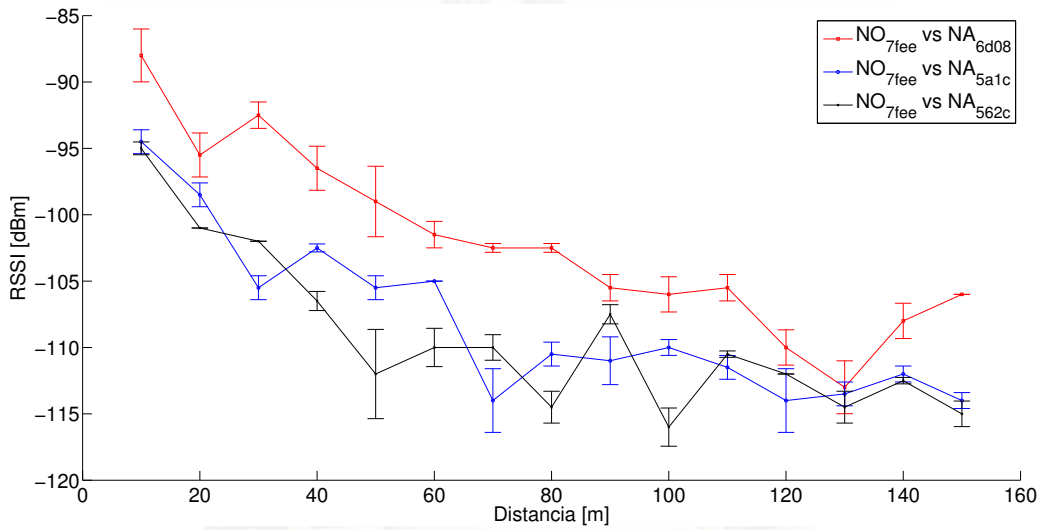
4.2.5.2. Evaluación del comportamiento RSSI en distintos escenarios

La evaluación está conformada por pruebas en los dos primeros escenarios de la Tabla 4.6, que consisten en establecer enlaces de comunicación entre nodo objetivo conocido como NO y nodo ancla conocido como NA, utilizando dispositivos FiPy o LoPy para evaluar el comportamiento de las mediciones RSSI en cada uno de los escenarios. Por otra parte, el tercer escenario de la Tabla 4.6 se utiliza en secciones posteriores para validar los resultados obtenidos en el Escenario 2.

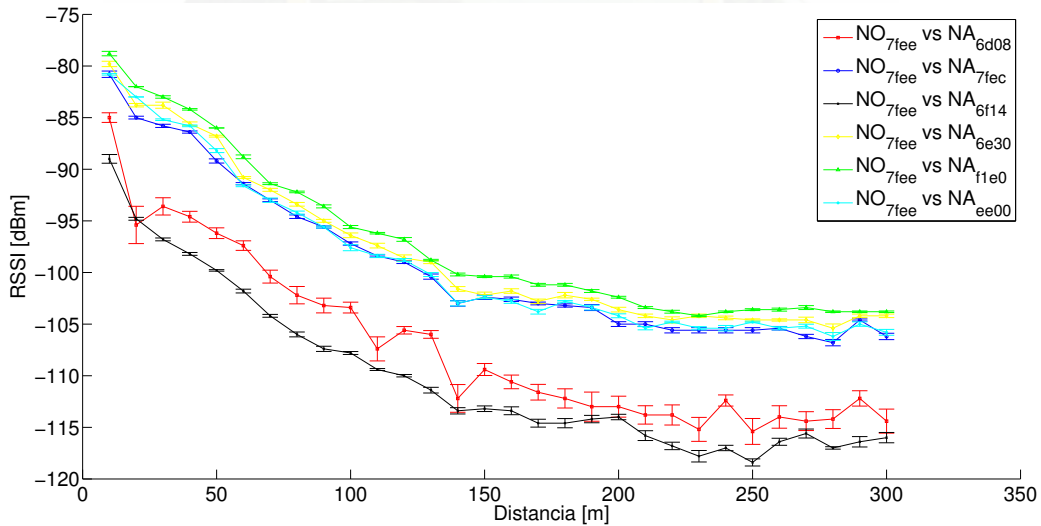
En este contexto, el procedimiento de evaluación es el mismo para los dos primeros escenarios y consiste en medir la variación de las mediciones RSSI en función de la distancia. Por tanto, se realiza las mediciones a saltos de 10 m hasta el límite de cada escenario. De esta manera, la Figura 4.8 muestra el resultado de la prueba 1 y 2 correspondiente a los escenarios 1 y 2 respectivamente. Es evidente un comportamiento no confiable en las mediciones RSSI en el escenario 1, debido a que no es posible establecer una curva de caracterización confiable de los enlaces de comunicación entre dispositivos FiPy y LoPy. Por lo tanto, este escenario no es útil para utilizar el PS con los dispositivos disponibles.

En cambio, las mediciones RSSI en el escenario 2 presentan una tendencia confiable para ca-

racterización hasta 100 m. En consecuencia, es posible la implementación del sistema de posicionamiento en este escenario. Además, es importante destacar que de acuerdo a las mediciones realizadas, cada sensor **RSSI** incorporado en los dispositivos **LoRa** actúan de manera diferente, por lo tanto, no es posible generalizar los cálculos de caracterización entre transmisor y receptor con solo un **PLM**. Es decir, se necesita un **PLM** para cada enlace.



(a) Prueba 1: variable **RSSI** en el escenario 1.



(b) Prueba 2: variable **RSSI** en el escenario 2.

Figura 4.8: Pruebas de comportamiento en escenarios urbano y rural a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.

4.3. Arquitectura del sistema de posicionamiento

Para implementar el sistema de posicionamiento se ha elegido una arquitectura centralizada en el nodo objetivo. Es decir, el nodo objetivo establece un enlace de comunicación selectivamente con cada nodo ancla a la vez, con un procedimiento análogo al *round-robin scheduling*. Cada enlace tiene el objetivo de almacenar el valor de la variable **RSSI** resultante de la comunicación entre nodo objetivo y nodo ancla. Luego con ayuda del algoritmo de posicionamiento **RSSI** y localización trilateración implementado en el **PS**, se procede a estimar la ubicación del nodo objetivo (Figura 4.9).

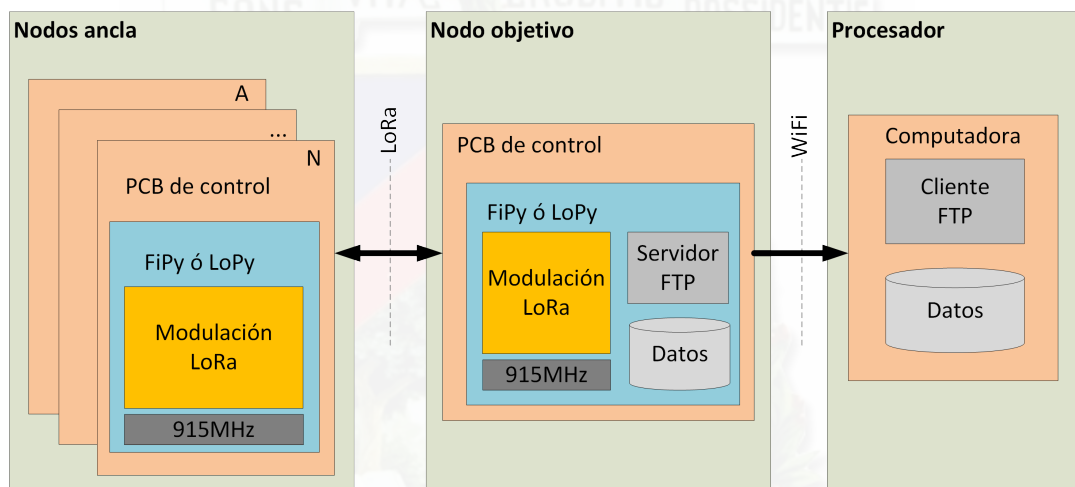


Figura 4.9: Arquitectura general del sistema de posicionamiento.

4.3.1. Descripción de la arquitectura general

En esta sección se describen los tres componentes importantes de la arquitectura general del sistema de posicionamiento propuesto. Estos 3 componentes principales son, el nodo ancla, el nodo objetivo y el procesador que se muestran en la Figura 4.9. Se describen también las interfaces involucradas en la comunicación entre el nodo objetivo con cada nodo ancla y con el procesador.

4.3.1.1. Arquitectura de los nodos ancla

La arquitectura de cada nodo ancla se divide a su vez en dos componentes importantes: (1) El módulo de control, implementado en el **PCB** respectivo que se encarga de configurar y ajustar los parámetros de funcionamiento como: voltaje y corriente de los dispositivos FiPy o LoPy; y (2) El modulo que implementa la modulación **LoRa**, que permite configurar los parámetros



radio como: BW , SF , frecuencia de operación y P_{TX} , con el fin de establecer un enlace de comunicación mediante un interfaz $LoRa$ con el nodo objetivo.

4.3.1.2. Arquitectura de nodo objetivo

Por su parte, la arquitectura del nodo objetivo se divide en tres componentes importantes: (1) El módulo de control, implementado en el PCB respectivo que se encarga de configurar y ajustar los parámetros de funcionamiento como: voltaje y corriente de los dispositivos $FiPy$ o $LoPy$; (2) El modulo que implementa la modulación $LoRa$, que permite configurar los parámetros radio como: BW , SF , frecuencia de operación y P_{TX} , con el fin de establecer un enlace de comunicación mediante un interfaz $LoRa$ con el nodo ancla; y (3) Un servidor FTP , que establece un enlace de comunicación con el procesador o computador mediante un interfaz $WiFi$, con el fin de transferir los valores $RSSI$ almacenados en la memoria interna del nodo objetivo para su posterior procesamiento.

4.3.1.3. Arquitectura del procesador de datos

El procesador de datos consiste básicamente en una computadora. En esta se ha configurado un cliente FTP para obtener los datos desde el nodo objetivo. La tarea principal del procesador es la de obtener los archivos que contienen las mediciones de las variables $RSSI$ para su posterior procesamiento dentro del algoritmo de posicionamiento y localización que finalmente estima la posición del objetivo.

4.3.2. Subsistemas del sistema de posicionamiento

El sistema de posicionamiento implementado a través de la tecnología $LoRa$ y basado en el algoritmo de posicionamiento $RSSI$ se divide en 6 subsistemas de: adquisición, preprocesamiento, almacenamiento, extracción, procesamiento y visualización del objetivo, los mismos que se detallan en la Tabla 4.7.

4.3.3. Comunicaciones en el sistema de posicionamiento

Debido a la arquitectura centralizada del sistema de posicionamiento propuesto, se tiene 2 enlaces de comunicación importantes: (1) El enlace de comunicación entre el nodo objetivo y cada uno de los nodos ancla mediante un interfaz $LoRa$ para enviar solicitudes y capturar valores relevantes como: $RSSI$ y SNR ; y (2) El enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador mediante un interfaz $WiFi$ utilizando el protocolo FTP para extraer los archivos desde el nodo objetivo hacia la computadora y utilizar esta información en el PS .

Subsistema	Función
Adquisición	Encargado de capturar el valor de las variables RSSI y SNR resultantes de establecer un enlace de comunicación LoRa entre el nodo objetivo y cada uno de los nodos ancla. Se encuentra ubicado en el nodo objetivo y debe ser capaz de identificar a cada nodo ancla.
Preprocesamiento	Se encuentra ubicado en el nodo objetivo, es básicamente un filtro que actúa en tiempo real mientras se realiza las mediciones. Su tarea eliminar valores irrelevantes, por ejemplo, cuando una transmisión no se completa el valor de la variable RSSI es nulo y debería descartarse.
Almacenamiento	Para almacenar los datos de medición correctamente es necesario diferenciar entre los diferentes enlaces. Por tanto, cada nodo ancla tiene un identificador diferente que sirve para relacionar los datos de medición con el nodo ancla que participa en el enlace respectivo. Este subsistema está ubicado en la memoria interna del nodo objetivo y almacena por carpetas de cada nodo ancla en archivos de texto (.txt) las variables RSSI y SNR .
Extracción	Se encarga de extraer los archivos de la memoria interna del nodo objetivo llevarlos al procesador mediante un interfaz WiFi y un cliente FTP .
Procesamiento	Se encarga de realizar el análisis de los datos de cada enlace entre nodo objetivo y nodo ancla para estimar la distancia del enlace mediante el PLM correspondiente. Posteriormente se utiliza esta información en el algoritmo de localización se obtiene la estimación de la posición del objetivo. El procesamiento se realiza utilizando el programa matemático MATLAB .
Visualización	Se encarga de presentar la ubicación del nodo objetivo dentro del escenario de medición mediante un interfaz de usuario implementado también en MATLAB .

Tabla 4.7: Subsistemas del sistema de posicionamiento.

4.3.3.1. Enlace de comunicación entre el nodo objetivo y los nodos ancla

El nodo objetivo tiene que diferenciar a cada nodo ancla, por lo tanto, existe un identificador único para cada nodo ancla. El identificador de 1 Byte es enviado en la carga útil de la trama **LoRa** por el nodo objetivo que busca un enlace con el nodo ancla. En este contexto, la Tabla 4.8 muestra la configuración de parámetros de la modulación **LoRa** para los dispositivos FiPy o LoPy. Además, la trama final de la transmisión en capa 2 varía según la configuración de parámetros de la modulación **LoRa** como muestra la Figura 4.10 en la que se presenta la estructura de una trama de capa 2 **LoRa** (Apéndice B). En donde, se puede observar que la trama **LoRa** siempre agrega cabeceras a la carga útil como preámbulo y corrección de errores.

Parámetro	SF	BW (kHz)	Preámbulo	Condng Rate (CR)	P_{TX} (dBm)
Valor	12	500	8	4/5	5

Tabla 4.8: Parámetros de modulación LoRa.

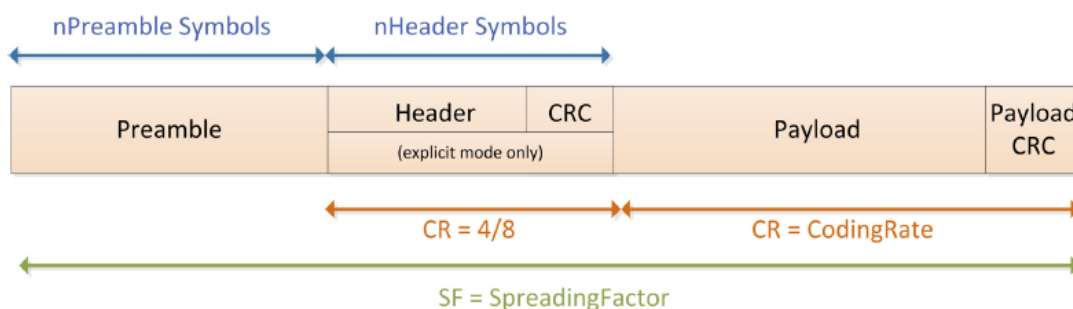


Figura 4.10: Estructura de una trama de capa 2 LoRa, Apéndice F [8, 9].

Por otra parte, la comunicación entre el nodo objetivo y cada nodo ancla requiere de la siguiente secuencia de mensajes: (Figura 4.11) (1) Petición de mensaje, el nodo objetivo envía una petición en difusión; (2) Autenticación de dispositivo, únicamente responde el nodo ancla que tiene el identificador de la petición enviada; y (3) Envío de respuesta, el nodo ancla luego de autenticarse envía la respuesta en la carga útil. Al mensaje de respuesta desde el nodo ancla al nodo objetivo se le conoce como enlace de vuelta; y se le captura también su variable **RSSI** que es de utilidad para el **PS**.

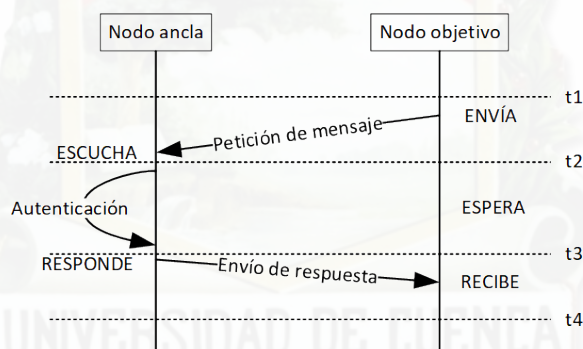


Figura 4.11: Secuencia de mensajes del enlace de comunicación entre nodo objetivo y ancla.

4.3.3.2. Enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador

El enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador sirve para extraer los datos almacenados en la memoria interna del nodo objetivo hacia el procesador. Esto se realiza mediante un interfaz WiFi y a través del protocolo **FTP** que permite la transferencia de datos entre un cliente y un servidor. El cliente **FTP** se ejecuta en la aplicación *Filezilla* instalada en la computadora cliente. En este contexto, el enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador requiere la siguiente secuencia de mensajes: (1) El procesador establece la primera conexión con el nodo objetivo para el tráfico de control por medio del puerto 21 del protocolo de

control de transmisión ([Transmission Control Protocol \(TCP\)](#)); y (2) El procesador establece la segunda conexión al servidor para la transferencia de datos por medio del puerto 20 de [TCP](#) (Figura 4.12).

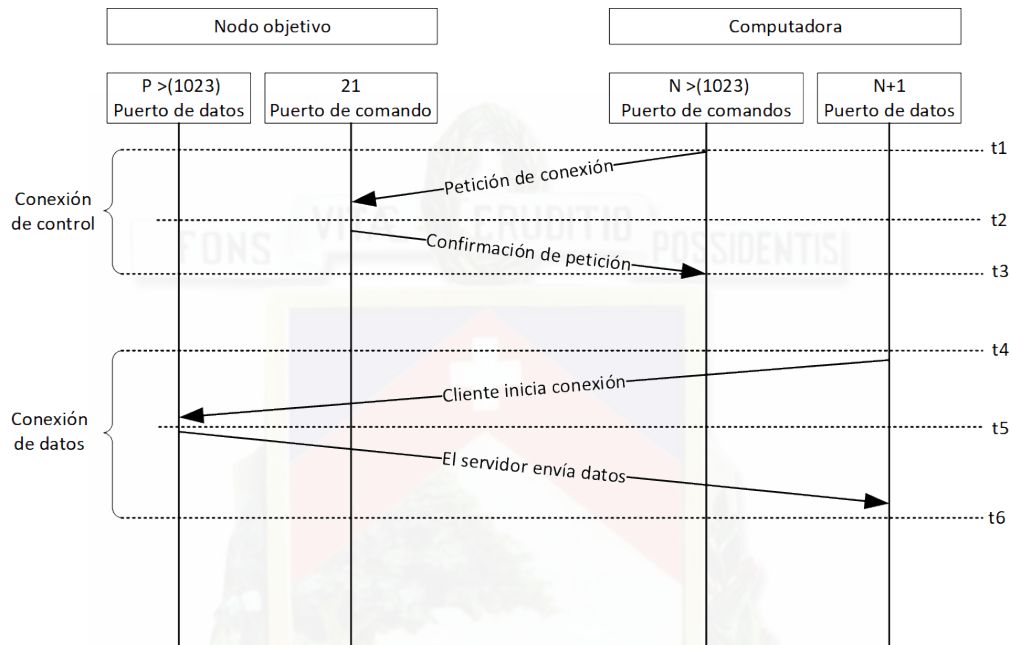


Figura 4.12: Secuencia de mensajes del enlace de comunicación entre el nodo objetivo y el procesador.

4.4. Implementación del sistema de posicionamiento

Para implementar el sistema de posicionamiento basado en el algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) y localización trilateración con tecnología [LoRa](#), es necesario establecer la configuración de cada uno de los dispositivos que conforman la arquitectura general.

4.4.1. Configuración del nodo objetivo y los nodos ancla

El sistema de posicionamiento necesita configurar los nodos con la configuración de la modulación [LoRa](#) establecida en la Tabla 4.8 para dos enfoques de medición de la variable [RSSI](#). En primer lugar, para la caracterización de cada uno de los dos enlaces formados entre el nodo objetivo y nodo ancla, enlace de ida y enlace de vuelta respectivamente.

4.4.1.1. Configuración del nodo objetivo

El nodo objetivo considerado como nodo transmisor (T_X) es el nodo central del sistema de posicionamiento. Este establece la comunicación con cada uno de los nodos ancla mediante un interfaz [LoRa](#), con la configuración detallada en la Tabla 4.8. Tiene dos funciones importantes: (1) Almacenar las variables [RSSI](#) de las mediciones del enlace de vuelta formado entre el nodo ancla y el nodo objetivo medido en el nodo objetivo; y el enlace de ida medido en el nodo ancla; y (2) Probar el [PS](#) con puntos de medición para estimar la posición del objetivo. Además, debe comunicarse con el procesador mediante un interfaz WiFi con el protocolo [FTP](#) para extraer los archivos desde el nodo objetivo hacia el computador. Toda la configuración se realiza en los dispositivos FiPy o LoPy mediante *Micropython* que es un lenguaje de programación derivado de *Python* y cuenta con la mayoría de sus librerías (véase Secciones 4.3.3.1, 4.3.3.2 y Apéndice D).

4.4.1.2. Configuración del nodo ancla

El nodo ancla considerado como nodo receptor (R_X) debe comunicarse con el nodo objetivo mediante un interfaz [LoRa](#), con la configuración de la Tabla 4.8. Además, debe capturar y enviar las variables [RSSI](#) medidas del enlace de ida formado entre el nodo objetivo y el nodo ancla medido desde el nodo ancla. De igual manera, toda la configuración se realiza mediante el lenguaje de programación *Micropython*.

4.4.1.3. Modelamiento del escenario

De acuerdo a la evaluación de los escenarios urbanos y rurales realizada en la Sección 4.2.5.2, se comprobó que el Escenario 2 ubicado en una zona rural con línea de vista es apropiado para evaluar el funcionamiento del [PS](#). Un aspecto muy importante es el modelamiento empírico del modelo de pérdidas por trayectoria de cada uno de los enlaces entre el nodo objetivo y los nodos ancla. El procedimiento de modelamiento sigue cada uno de los subsistemas de la Tabla 4.7.

Para realizar el modelo empírico se establece un enlace entre el nodo objetivo y en nodo ancla, considerándose enlace de ida cuando el nodo objetivo es T_X y el nodo ancla es R_X ; y viceversa para el enlace de vuelta. El procedimiento consiste en medir la variable [RSSI](#) en saltos de 10 m, es decir, una separación conocida como promediado espacial, hasta 300 m. El promediado espacial es el intervalo de medición, es decir, la separación entre mediciones de 20λ y 40λ entre cada medida [13, 14].

En este contexto, la Tabla 4.9 muestra los límites inferior (20λ) y superior (40λ) de las distancias de separación para las bandas [ISM](#), y la distancia de separación seleccionada. En este contexto, se ha seleccionado el intervalo de medición de 10 m, ya que el [PS](#) funciona en la banda

915 MHz (Tabla 4.1). En esta etapa el subsistema de adquisición y el de almacenamiento se encargan de medir y almacenar los valores de las variables RSSI y SNR. El enlace de ida se mide en el nodo ancla y se almacena en el nodo objetivo. En cambio, el enlace de vuelta se mide y almacena en el nodo objetivo. Adicionalmente, el subsistema de preprocesamiento se encarga de filtrar los valores RSSI que sean irrelevantes (Tabla 4.7).

Banda ISM (MHz)	20λ (m)	40λ (m)	Distancia seleccionada (m)
433	13.85	27.71	20
868	6.91	13.82	10
915	6.55	13.11	10

Tabla 4.9: Promediado espacial [13, 14].

Luego en el subsistema de extracción, el cliente FTP extrae los datos de la memoria interna del nodo objetivo al procesador. Esto con el objetivo de obtener el PLM correspondiente a cada enlace de comunicación mediante el programa de análisis estadístico *Microsoft Excel*.

4.4.2. Funcionamiento del sistema de posicionamiento

La clave para el buen funcionamiento del PS es la exactitud en la estimación de la distancia entre el nodo objetivo y cada uno de los nodos ancla. En otras palabras, la calidad del PLM empírico ayuda a obtener mejor exactitud en la estimación de la distancia entre los distintos enlaces. Con estos modelos, el PS puede estimar la ubicación de un punto de coordenadas cartesianas (x, y) dentro del escenario de medición mediante el algoritmo de localización basado en trilateración (Apéndice A). Por ejemplo, la Figura 4.13 muestra la distribución de 4 nodos ancla y un nodo objetivo en un escenario de medición.

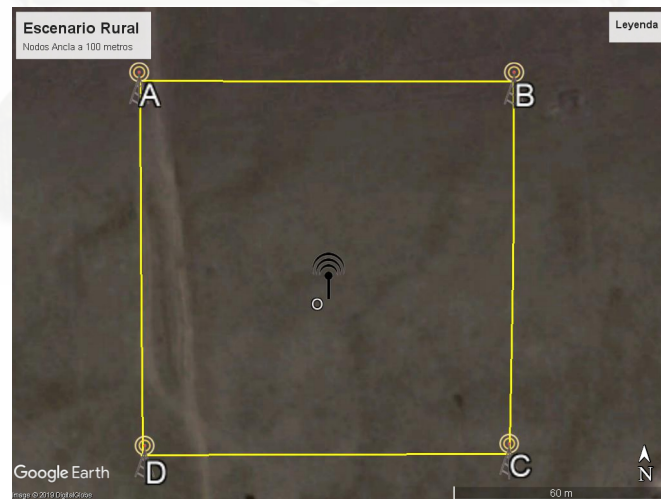


Figura 4.13: Escenario rural de 4 nodos ancla con LoS.

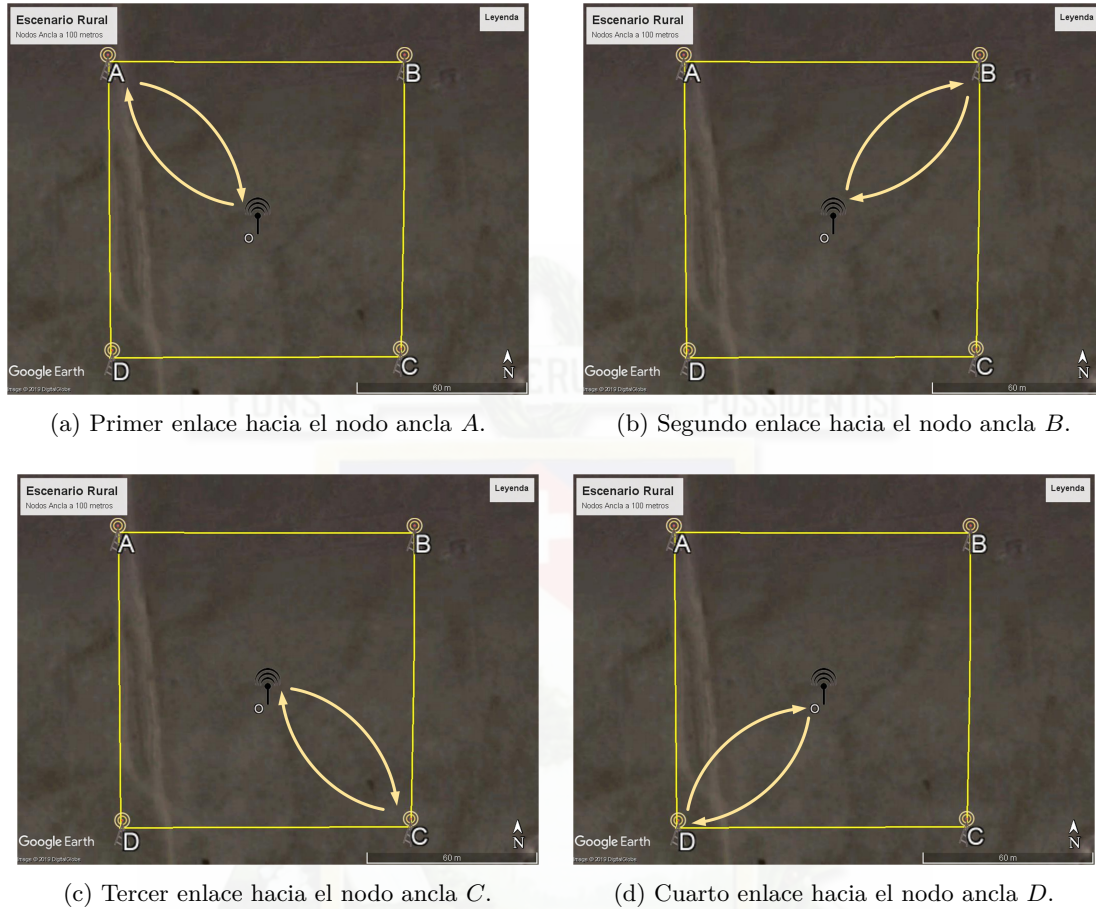


Figura 4.14: Adquisiciones RSSI con el método *round-robin scheduling*.

En el escenario de la Figura 4.13 los identificadores de los nodos ancla son A, B, C y D; y sus respectivas posiciones fijas son (0,0), (0,100), (100,100) y (100,0). Además, el nodo objetivo se ubica dentro del área formada por los nodos ancla para iniciar el subsistema de adquisición de valores de la variable RSSI y SNR. Al mismo tiempo se ejecuta el subsistema de preprocesamiento encargado de filtrar los valores de la variable RSSI irrelevantes. Es importante destacar que el procedimiento de adquisición elige de manera selectiva y circular iniciando por el nodo ancla A hasta el nodo ancla D, de manera similar al método *round-robin scheduling* (Sección 4.3.1.1). En este contexto la Figura 4.14 muestra la secuencia de selección de nodos ancla.

Al mismo tiempo, el subsistema de almacenamiento se encarga de guardar en la memoria interna del nodo objetivo los valores de las variables RSSI de los enlaces de ida y de vuelta. En este contexto, la Figura 4.15 muestra el procedimiento del subsistema de almacenamiento en tiempo real para un dispositivo LoPy. En primer lugar el nodo objetivo debe seleccionar un nodo ancla

y luego almacenar en un archivo de texto (.txt), en la carpeta correspondiente a cada nodo ancla 25 muestras de las variables [RSSI](#) y [SNR](#).

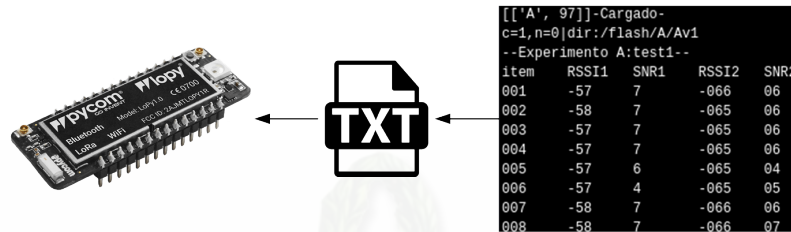


Figura 4.15: Datos almacenados en el dispositivo LoPy.

Adicionalmente, como se observa en las Figuras [4.15](#) y [4.16](#) los valores obtenidos por el subsistema de adquisición se pueden observar en tiempo real mediante un terminal virtual utilizando el protocolo *Telnet* o mediante el computador con un interfaz [REPL](#).



Figura 4.16: Visualización de las mediciones RSSI y SNR mediante el protocolo *Telnet* y un interfaz REPL.

Posteriormente, el subsistema de extracción conectado mediante WiFi y con un cliente [FTP](#) configurado en la computadora, extrae los archivos de medición. La Figura [4.17](#) muestra el proceso de extracción de archivos entre el dispositivo LoPy y la computadora.

Por su parte, la Figura [4.18](#) muestra el interfaz de la aplicación *Filezilla* instalada en la computadora, donde se puede visualizar la memoria interna del dispositivo FiPy o LoPy y las archivos extraídos satisfactoriamente a la memoria de la computadora.

Finalmente, con los archivos en la memoria de la computadora, el subsistema de procesamiento se encarga de estimar la ubicación del nodo objetivo mediante un sistema de referencias

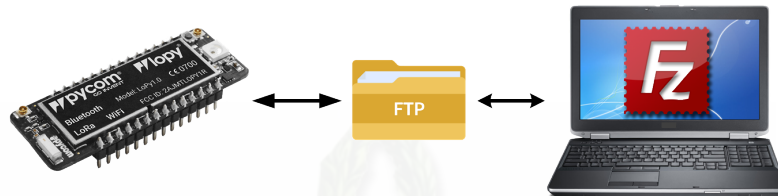


Figura 4.17: Proceso de extracción de archivos entre el nodo objetivo y la computadora.

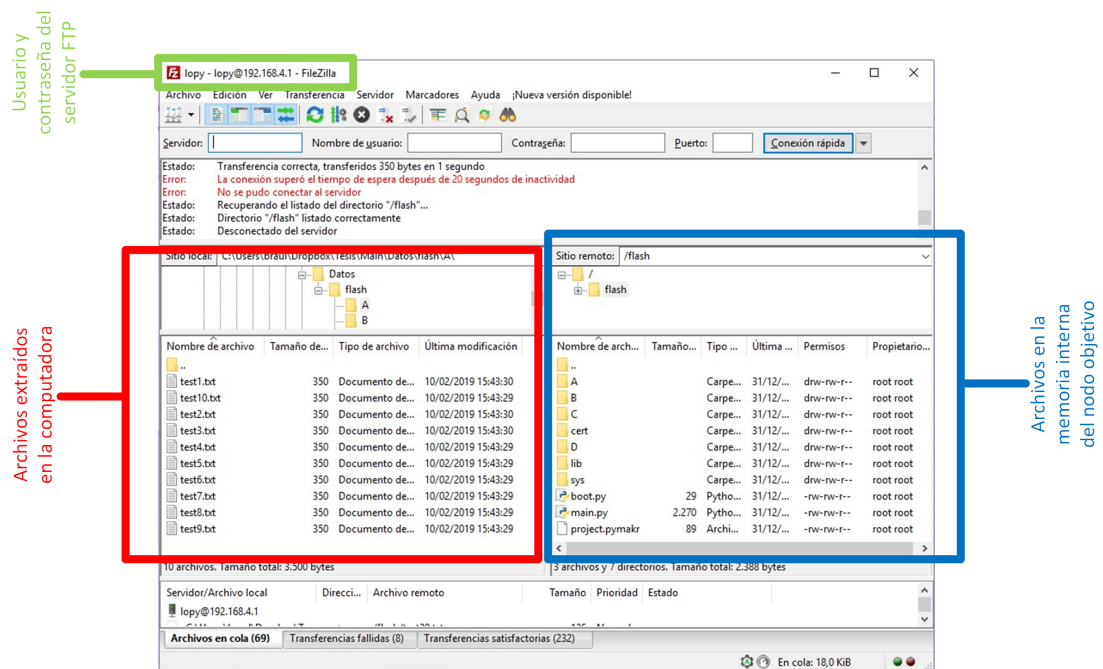


Figura 4.18: Datos extraídos satisfactoriamente a la memoria de la computadora.

cartesianas de coordenadas (x, y) ubicadas dentro del área formada por los nodos ancla. Adicionalmente, el subsistema de visualización mediante un interfaz de usuario muestra la ubicación del objetivo dentro del PS. La Figura 4.19 muestra un ejemplo de visualización de la posición estimada con el PS mediante un interfaz gráfica programada en *MATLAB*.

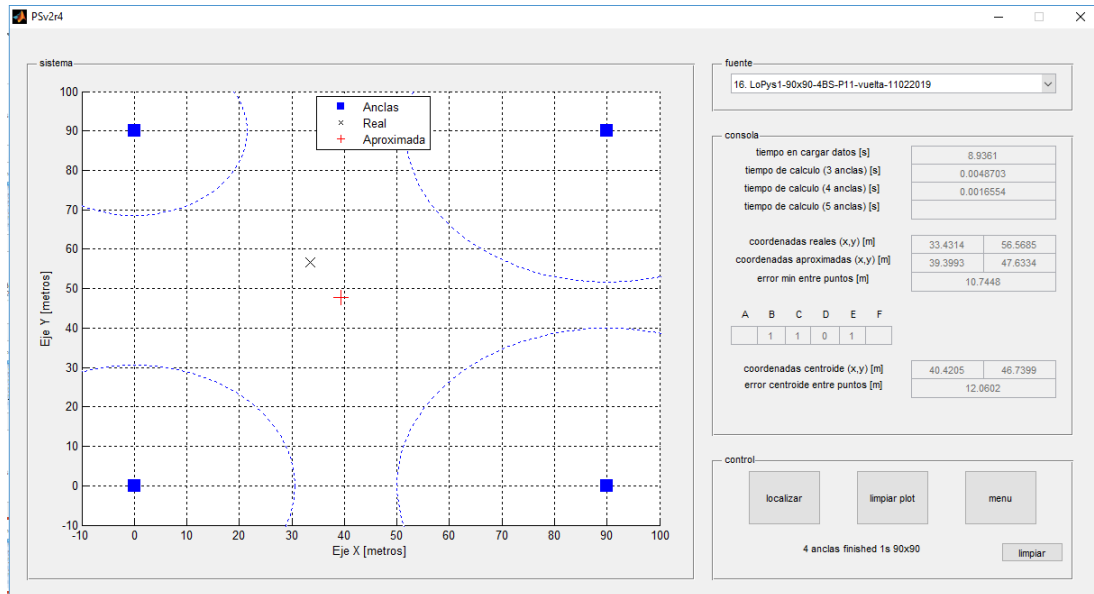


Figura 4.19: Visualización de la posición estimada.

4.5. Conclusiones

Para diseñar un sistema de posicionamiento es imprescindible disponer de información sobre las características RF de los dispositivos disponibles, con el objetivo de seleccionar el algoritmo de posicionamiento adecuado para el mismo. Por lo general el algoritmo de localización depende del algoritmo de posicionamiento seleccionado.

Por otra parte, para la implementación del PS se necesita establecer la arquitectura general con el fin de identificar los subsistemas involucrados en la comunicación entre los nodos ancla y el nodo objetivo. Con esta información es posible identificar las interfaces de comunicación entre los distintos dispositivos. Además, se debe determinar el algoritmo de programación y la configuración LoRa que tiene cada dispositivo.

En este contexto y debido a las características técnicas y de RF de los dispositivos FiPy y LoPy disponibles, el presente trabajo de titulación consiste en diseñar e implementar un sistema de posicionamiento basado en el algoritmo de posicionamiento RSSI y localización por trilateración. Por lo tanto, como los sistemas de posicionamiento basados en características RSSI son menos



predecibles y pueden estar sujetos a muchas fuentes de error, el objetivo de este trabajo es mitigar al máximo las fuentes de error para evaluar el funcionamiento del [PS](#) con dispositivos de bajo costo.



Capítulo 5

Resultados y discusiones

En este capítulo se presenta una recopilación de las pruebas preliminares del sistema de posicionamiento. Las primeras campañas de medición permiten detectar problemas de comportamiento en la implementación del PS e indica las posibles medidas correctivas. Las medidas correctivas consideran: (1) Diferentes enfoques para analizar los valores de la variable RSSI en los escenarios de medición tanto simétricos como no simétricos; (2) Filtros de valores de la variable RSSI cuando se producen malos comportamientos. Finalmente, con una ultima campaña de medición y con todas las medidas correctivas, se analiza el error de estimación de la posición de cada uno de los escenarios de medición, enfocándose en dos aspectos: simulación versus medición *in situ*; y se compara con otros trabajos relacionados.

5.1. Introducción

En el Capítulo 4 se establece que la configuración LoRa con $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm garantiza un comportamiento estable en la caracterización de los enlaces en un PS. De esta manera, en este capítulo se evalúa el sistema de posicionamiento propuesto a través de un conjunto de campañas de medición. Como se explicó anteriormente el PS propuesto está basado en el algoritmo de posicionamiento RSSI y algoritmo de localización por trilateración. Además, se incluye la identificación y solución de posibles problemas de mal comportamiento para garantizar la fiabilidad del sistema.

En consecuencia, en primer lugar es necesario establecer distintos escenarios de evaluación con diferencia entre ellas en cuanto a: la cantidad de nodos ancla, distancia entre nodos ancla, enfoques de caracterización y enfoques del uso de la variable RSSI. Con todo esto, se evalúa posteriormente el comportamiento del error de estimación de la posición en los escenarios, enfocándose en dos aspectos: una evaluación basada en simulación en comparación de una

evaluación basada en mediciones de campo. Finalmente se hace una comparación del sistema propuesto con otros trabajos relacionados repartidos en la literatura.

5.2. Análisis preliminar

Este análisis se divide en tres campañas de medición para evaluar el comportamiento del sistema de posicionamiento e identificar los posibles problemas de mal comportamiento de los dispositivos. Cada una de las campañas de medición sirve para identificar los problemas para su posterior mitigación. Para evaluar las campañas de medición se requieren distintos escenarios, los mismos que se han dividido en dos tipos: simétrico y no simétrico, que se diferencian sobre todo en la distribución geométrica de los nodos ancla. En los escenarios de tipo simétrico, los nodos ancla tienen una distribución regular cuadrada, mientras que en el escenario no simétrico, la distribución de los nodos ancla es aleatoria.

El Escenario rural 2 seleccionado como el entorno de prueba adecuado para un PS basado en RSSI (Sección 4.2.5.2), se ha dividido a su vez en otros escenarios de acuerdo al tipo simétrico o no simétrico (Tabla 5.1). Las dimensiones de los escenarios de medición fueron seleccionadas considerando que la distancia entre nodo objetivo y nodo ancla no debe superar los 100 m establecidos como tendencia aceptable (Sección 4.2.5.2).

Tipo	Descripción
Simétrico	Escenario 1: 60 m×60 m
	Escenario 2: 90 m×90 m
	Escenario 3: 150 m×150 m
no simétrico	Escenario 4: máxima distancia entre nodos ancla \geq 100 m
	Escenario 5: máxima distancia entre nodos ancla $<$ 100 m

Tabla 5.1: Descripción de los escenarios de prueba del PS.

5.2.1. Primera campaña de medición

En la primera campaña de medición los dispositivos LoPy están identificados de acuerdo a la Tabla 5.2. Dichos dispositivos forman el Escenario 2 de la Tabla 5.1 que consta de 3 nodos ancla, con identificadores A , B y C . Sus respectivas posiciones fijas son: $(0, 0)$, $(0, 90)$ y $(90, 90)$ y el nodo objetivo que tiene el identificador M .

La caracterización del enlace de cada nodo ancla con el nodo objetivo sigue el procedimiento explicado en la Sección 4.4.1.3. Cada enlace se caracteriza siguiendo una línea recta de 300 m

Nodos	A	B	C	M
ID	6d08	5a1c	762c	7fee
Tipo	LoPy 1.0	LoPy 4.0	LoPy 4.0	LoPy 1.0

Tabla 5.2: Identificación de los dispositivos LoRa en la primera campaña de medición.

de largo con saltos de 10m cerca de la ubicación del escenario de prueba (Figura 4.13). La caracterización resultante se muestra en la Figura 5.1.

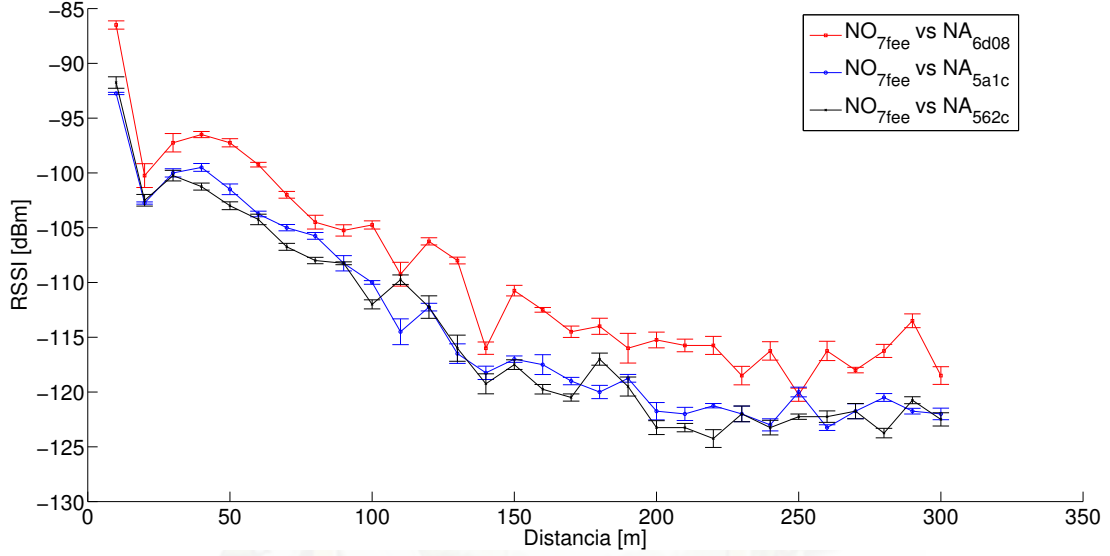


Figura 5.1: Caracterización de la primera campaña de medición a BW= 500 kHz, SF = 12 y $P_{TX} = 5$ dBm.

La Tabla 5.3 muestra la posición real de los puntos de prueba del nodo objetivo en el Escenario 2 de la Tabla 5.1 de los que se desea estimar la posición con el PS propuesto.

ID	P_1	P_2	P_3
x (m)	45	35.35	56.56
y (m)	45	35.35	56.56

Tabla 5.3: Puntos reales de la primera campaña de medición.

Por otra parte, la Tabla 5.4 muestra el error de estimación del PS con los puntos de prueba P_1 , P_2 y P_3 de la Tabla 5.3. El error de estimación consiste en aplicar la formula geométrica para calcular la distancia entre dos puntos $P_r(x_r, y_r)$ y $P_e(x_e, y_e)$, los puntos real y estimado respectivamente. Este escenario cuenta solamente con 3 nodos ancla, por lo tanto, para estimar la ubicación del nodo objetivo se aplica el algoritmo de localización trilateración para 3 nodos ancla (Apéndice A). Además, la Tabla 5.4 muestra el error de estimación promedio de la campaña medición 1 y prueba 1 ($\bar{e}_{1,1}$); y un porcentaje de error respecto a la máxima distancia

posible 127.27 m que es la diagonal del escenario cuadrado de dimensión 90 m×90 m.

$\bar{e}_{campana, prueba}$	P_1	P_2	P_3	\bar{e} (m)	(%)
$\bar{e}_{1,1}$	15.59	19.82	18.91	18.11	14.23
$\bar{e}_{2,1}$	1.55	14.90	15.99	10.81	8.49
$\bar{e}_{2,2}$	—	8.78	23.27	16.03	12.59
$\bar{e}_{2,3}$	—	7.17	17.77	12.47	9.79
$\bar{e}_{2,4}$	—	8.41	20.55	14.48	11.38

Tabla 5.4: Errores de estimación de la primera y segunda campaña de medición.

De la Tabla 5.4 es evidente que el error de estimación es alto en la campaña de medición 1 y prueba 1. Producto de una cantidad insuficiente de nodos ancla. Además, el comportamiento RSSI de los dispositivos LoPy versión 4.0 no es el esperado, como se puede observar en la Figura 5.1. De este modo, la segunda campaña de medición considera hasta 5 nodos ancla para ayudar a reducir el error de estimación promedio y descarta el uso de dispositivos LoRa con diferente chip *Semtech* [37], esto debido a que presenta una diferente sensibilidad RSSI. Esto es más crítico al usar dispositivos LoPy 4.0 que tienen incorporados el chip *SX1276* a diferencia de los dispositivos FiPy y LoPy versión 1.0 que tienen incorporado el chip *SX1272* (Apéndice C). El problema radica en que chips diferentes tienen diferente sensibilidad RSSI que agrega una mayor incertidumbre de medición al sistema.

5.2.2. Segunda campaña de medición

En la segunda campaña de medición, los dispositivos FiPy y LoPy están identificados de acuerdo a la Tabla 5.5. Los dispositivos forman el Escenario 2 de la Tabla 5.1 con 4 y 5 nodos ancla respectivamente; y las pruebas a realizar se describen en la Tabla 5.6.

Nodos	A	B	C	D	E	F	M
ID	6d08	7fec	6f14	6e30	f1e0	ee00	7fee
Tipo	LoPy 1.0	LoPy 1.0	LoPy 1.0	LoPy 1.0	FiPy	FiPy	LoPy 1.0

Tabla 5.5: Identificación de los dispositivos LoRa en la segunda campaña de medición.

Prueba	Descripción
1	Conformada por 4 nodos ancla A, B y C de la Tabla 5.2; y D de la Tabla 5.5.
2	Conformada por 5 nodos ancla A, B y C de la Tabla 5.2; D y E de la Tabla 5.5.
3	Conformada por 4 nodos ancla A, B, C y D de la Tabla 5.5.
4	Conformada por 5 nodos ancla A, B, C, D y E de la Tabla 5.5.

Tabla 5.6: Pruebas de la segunda campaña de medición.

La caracterización de cada enlace entre el nodo ancla y el nodo objetivo con identificador M sigue el procedimiento de la primera campaña de medición, y se muestra en la Figura 5.2.

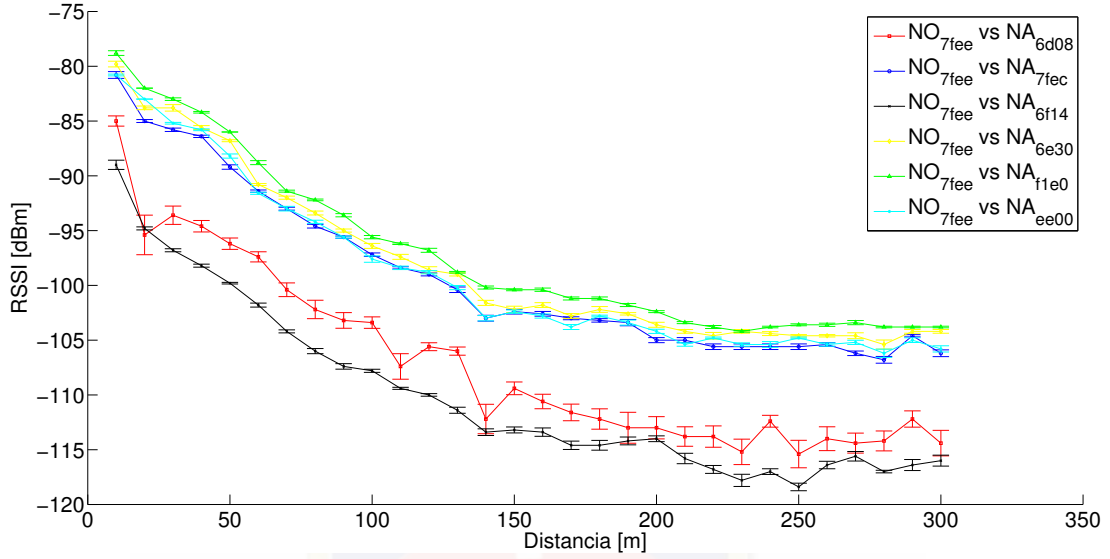


Figura 5.2: Caracterización de la segunda campaña de medición a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.

5.2.2.1. Prueba 1

Los identificadores A , B , C y D de la prueba 1 de la Tabla 5.6 forman un escenario híbrido entre dispositivos LoPy en sus versiones 1.0 y 4.0; cuyas posiciones fijas son: $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$ y $(90, 0)$. La Tabla 5.3 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 1 y estimar la posición del objetivo. Por otra parte, la Tabla 5.4 muestra el error de estimación promedio ($\bar{e}_{2,1}$) del PS con los puntos de la prueba 1: P_1 , P_2 y P_3 . La prueba 1 cuenta con 4 nodos ancla, por lo tanto, tiene 1 estimación útil para el algoritmo de localización por trilateración de 4 nodos ancla. Del mismo modo, con un análisis combinatorio se tiene $C_4^3 = 4$ posibles estimaciones útiles para el algoritmo de localización trilateración de 3 nodos ancla. Esto da un total de 5 posibles estimaciones para la prueba 1. Siguiendo el procedimiento anterior, la Tabla 5.7 muestra el conjunto de posibles estimaciones para escenarios con 3, 4, 5, 6 y 7 nodos ancla. Para seleccionar la mejor estimación de todo el conjunto de estimaciones se selecciona el punto centroide.

Nodos ancla	Formulación	Posibles estimaciones
3	C_3^3	1
4	$C_4^4 + C_4^3$	5
5	$C_5^5 + C_5^4 + C_5^3$	16
6	$C_6^6 + C_6^5 + C_6^4 + C_6^3$	42
7	$C_7^7 + C_7^6 + C_7^5 + C_7^4 + C_7^3$	99

Tabla 5.7: Conjunto de posibles estimaciones.

En este contexto, la campaña de medición 2 y prueba 1 en la Tabla 5.4 reduce el error de estimación ($\bar{e}_{2,1}$), resultado de agregar un nodo ancla a la primera campaña de medición.

5.2.2.2. Prueba 2

La prueba 2 agrega un nuevo nodo ancla a la prueba 1 de la Tabla 5.6, por tanto, los identificadores de la prueba 2 A , B , C , D y E tienen sus respectivas posiciones fijas $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$, $(90, 0)$ y $(45, 45)$. Por otra parte, la Tabla 5.3 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 2 y estimar la posición del objetivo. Finalmente, la Tabla 5.4 muestra el error de estimación promedio ($\bar{e}_{2,2}$) del PS con los puntos de la prueba 2. Además, la prueba 2 cuenta con 5 nodos ancla, por lo tanto, tiene 16 posibles estimaciones según la Tabla 5.7.

En este contexto, la campaña de medición 2 y prueba 2 en la Tabla 5.4 reduce el error de estimación ($\bar{e}_{2,2}$). A pesar de que, el error de estimación en el punto P_3 es alto. Esto se debe a niveles menores de 5 V de la batería que alimenta al módulo de control.

5.2.2.3. Prueba 3

En la prueba 3, los nodos identificados como: A , B , C y D de la Tabla 5.6 con posiciones fijas $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$ y $(90, 0)$ respectivamente, forman un escenario con únicamente dispositivos LoPy 1.0. Por otra parte la Tabla 5.3 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de la prueba 3 y estimar su posición. Finalmente, en la Tabla 5.4 muestra el error de estimación ($\bar{e}_{2,3}$) que tiene el PS.

En este contexto, la campaña de medición 2 y prueba 3 en la Tabla 5.4 aumenta el error de estimación ($\bar{e}_{2,3}$) en los puntos P_1 y P_3 debido al mal comportamiento de los dispositivos.

5.2.2.4. Prueba 4

De la misma forma que las pruebas anteriores, la prueba 4 tiene nodos identificados de la Tabla 5.6 como: A , B , C , D y E con posiciones fijas $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$, $(90, 0)$ y $(45, 45)$ respectivamente. Por otra parte, la Tabla 5.3 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de la prueba 4 y estimar su posición. Finalmente, la Tabla 5.4 muestra el error de estimación ($\bar{e}_{2,4}$) que tiene el PS. Además, la prueba 4 cuenta con 5 nodos ancla, por lo tanto, tiene 16 posibles estimaciones según la Tabla 5.7.

En este contexto, según la Tabla 5.4 para la campaña de medición 2 y prueba 4 es notable que el error de estimación ($\bar{e}_{2,4}$) en los puntos P_1 y P_3 aumenta debido al mal comportamiento de los dispositivos; que ocurre cuando el nivel de voltaje de la batería que alimenta al módulo de control es menor a 5 V.

Además, analizando las cuatro pruebas, se puede destacar que no existe una diferencia marcada entre usar un **PS** híbrido o no, es más importante mitigar los factores que introducen mal comportamiento. Sin embargo, analizando las Figuras 5.1 y 5.2 sobre la caracterización se puede notar dicha calidad del sensor **RSSI** de algunos dispositivos LoPy en sus versiones 4.0 y 1.0. Además, de los resultados de la segunda campaña de medición se destacan factores que evidencian mal comportamiento en las mediciones de la variable **RSSI**, como: (1) Batería de alimentación en nivel de voltaje inferior a 5 V; (2) Mala conexión de la antena del dispositivo FiPy o LoPy, lo que produce siempre valores menores de la variable **RSSI**. En base a estos primeros resultados preliminares, la tercera campaña de mediciones se eligen los dispositivos con un mismo chip **LoRa** con el mejor comportamiento de la variable **RSSI** se mitigan los factores ya identificados que producen mal comportamiento.

5.2.3. Consideraciones para la tercera campaña de medición

En base a los problemas presentados en las primeras campañas de medición, es necesario realizar un nuevo enfoque de caracterización, nuevos enfoques de uso de los valores de la variable **RSSI** y filtros para mitigar los factores de mal comportamiento detectados que introducen error al **PS**.

5.2.3.1. Nuevo enfoque de caracterización

En la primera y segunda campaña de medición se realiza la caracterización de cada enlace el entre nodo ancla y el nodo objetivo siguiendo una línea recta cerca del escenario de prueba. El nuevo enfoque busca obtener una caracterización más real, realizando la caracterización de cada enlace desde las posiciones fijas de los nodos ancla hasta 200 m con saltos de 10 m.

5.2.3.2. Tres nuevos enfoques de uso de la variable **RSSI**

Cada enlace el entre nodo objetivo y el nodo ancla tiene dos enlaces, es decir, el enlace de ida y el enlace de vuelta (Sección 4.4.2). Las primeras campañas de medición utilizan únicamente la información **RSSI** del enlace de vuelta para estimar la ubicación del objetivo en el **PS**. La tercera campaña de medición tiene como objetivo comparar el comportamiento del **PS** ante cada uno de los siguientes tres enfoques: (1) únicamente enlace de ida; (2) únicamente enlace de vuelta; y (3) un promedio entre enlace de ida y enlace de vuelta.

5.2.3.3. Filtro de factores que introducen error

Los factores identificados que producen un comportamiento no adecuado en las mediciones de la variable **RSSI**. Son: (1) Batería de alimentación en nivel de voltaje inferior a 5 V; (2) Mala

conexión de la antena del dispositivo FiPy o LoPy. En ambos casos el valor de la variable RSSI medida devuelve un valor mínimo debajo de -125 dBm. Por lo tanto, la tercera campaña de medición filtra los valores del RSSI no confiables que están por debajo de -115 dBm, es decir, el nodo ancla que produce valor por debajo de este umbral se descarta del análisis del PS por ser una medición no fiable. Este valor del umbral se obtiene analizando las Figuras 5.1 y 5.2 de caracterización de las primeras campañas de medición que evidencia que valores de RSSI debajo de -115 dBm ya no siguen una tendencia clara en el sistema propuesto.

5.2.4. Tercera campaña de medición

En la tercera campaña de medición los dispositivos FiPy y LoPy están identificados de acuerdo a la Tabla 5.8. Forman los Escenarios 1, 2 y 3 de la Tabla 5.1 con 4 y 5 nodos ancla; y las pruebas a realizar se describen en la Tabla 5.9.

Nodos	A	B	C	D	E	M
ID	<i>f1e0</i>	<i>ee00</i>	<i>fa04</i>	<i>7fec</i>	<i>6e30</i>	<i>7fee</i>
Tipo	<i>FiPy</i>	<i>FiPy</i>	<i>FiPy</i>	LoPy 1.0	LoPy 1.0	LoPy 1.0

Tabla 5.8: Identificación de los dispositivos LoRa en la tercera campaña de medición.

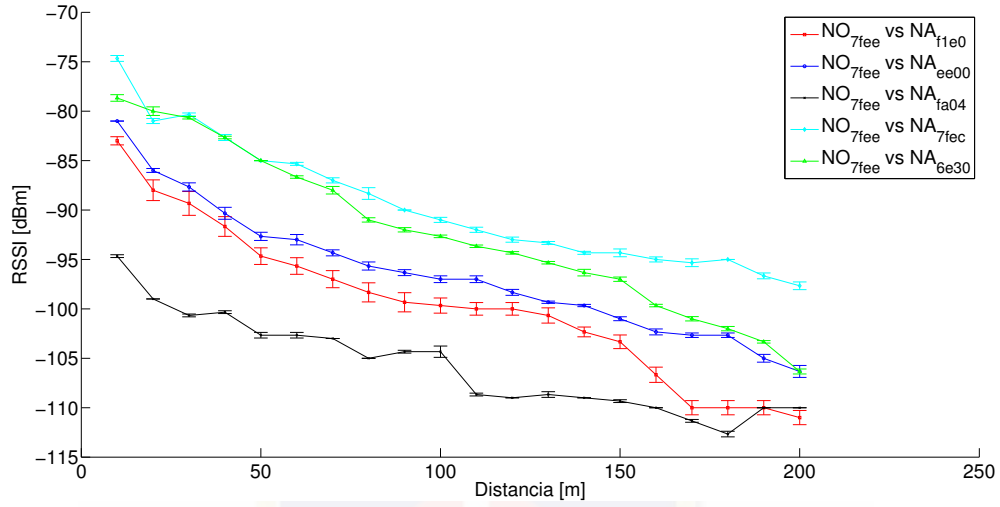
Prueba	Descripción
1	Conformada por 4 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> y <i>D</i> de la Tabla 5.8, escenario 1.
2	Conformada por 5 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> , <i>D</i> y <i>E</i> de la Tabla 5.8, escenario 1.
3	Conformada por 4 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> y <i>D</i> de la Tabla 5.8, escenario 2.
4	Conformada por 5 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> , <i>D</i> y <i>E</i> de la Tabla 5.8, escenario 2.
5	Conformada por 4 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> y <i>D</i> de la Tabla 5.8, escenario 3.
6	Conformada por 5 nodos ancla <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> , <i>D</i> y <i>E</i> de la Tabla 5.8, escenario 3.

Tabla 5.9: Pruebas de la tercera campaña de medición.

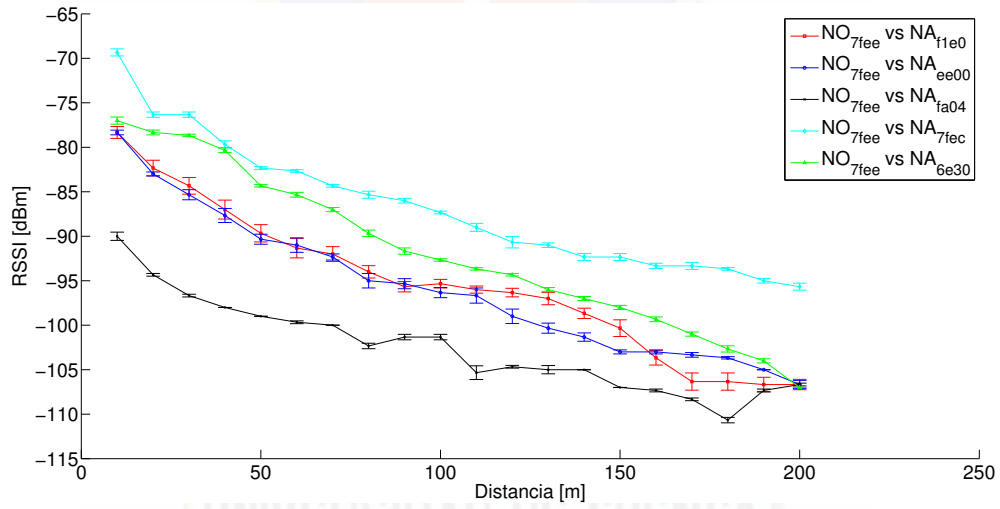
La caracterización de cada enlace entre el nodo ancla y el nodo objetivo con identificador *M* sigue el nuevo procedimiento de caracterización de la Sección 5.2.3.1. La caracterización resultante del escenario de dimensión $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ para cada uno de los tres enlaces se muestra en la Figura 5.3. Se sigue un procedimiento similar para los escenarios restantes de dimensión $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ y $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ respectivamente.

5.2.4.1. Evaluación de los modelos de pérdida por trayectoria

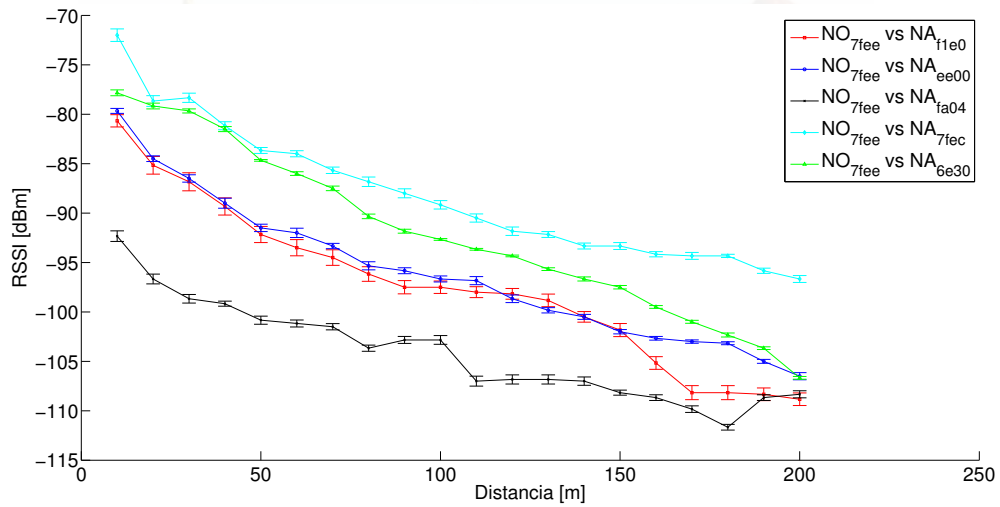
Para conocer el efecto de la incertidumbre de medición en la caracterización de cada modelo de pérdida por trayectoria, se requiere predecir el comportamiento del error de estimación introducido por cada uno de los PLMs. Es decir, determinar qué error tiene cada PLM al estimar alguno de los puntos de caracterización con salto de 10 m usando la información del



(a) Enlace de ida.



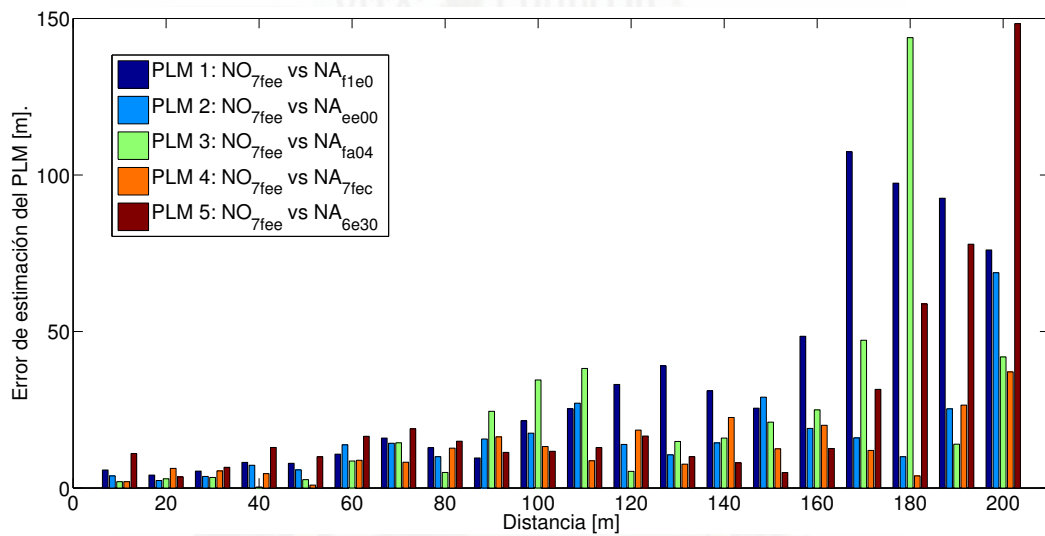
(b) Enlace de vuelta.



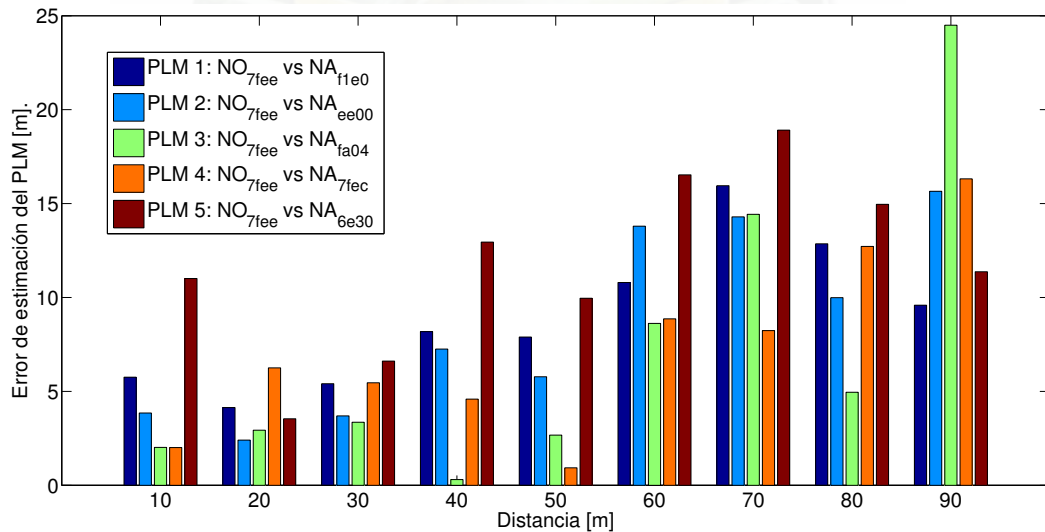
(c) Enlace de ida y vuelta.

Figura 5.3: Caracterización de la tercera campaña de medición, escenario de dimensión 90 m×90 m a BW= 500 kHz, SF = 12 y $P_{TX} = 5$ dBm.

intervalo de confianza de 95 % de cada punto de medición entre 10 – 200 m. Esto para cada uno de los enlaces de caracterización. La Figura 5.4a muestra el resultado general de evaluar cada PLM al calcular cada una de las distancias con salto de 10 m. En esta figura, se puede observar diferentes rangos de error producidos por los equipos de bajo costo que introducen incertidumbre visibles en la medición de la variable RSSI. Específicamente se observa los siguientes rangos de error: (1) Un error máximo de 12.95 m entre 10 – 50 m; (2) Un error máximo de 18.90 m entre 60 – 100 m; (3) Un error máximo de 16.59 m entre 110 – 150 m; y (4) Un error máximo de 148.32 m entre 160 – 200 m.



(a) Evaluación general.



(b) Evaluación específica.

Figura 5.4: Evaluación de los PLMs, de un escenario de dimensión 90 m×90 m.

Por su parte, la Figura 5.4b muestra el resultado específico de evaluar el comportamiento del error introducido por los PLMs para un escenario con dimensión de $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ usado en la tercera campaña de medición. En este, se puede observar un error máximo de 18.90 m al calcular alguna de las distancias con salto de 10 m . Por otra parte, el efecto del error introducido por cada PLM al calcular la distancia de algún punto de caracterización con salto de 10 m al usarlo en el algoritmo de localización por trilateración se detalla en el Apéndice A.2.

5.2.4.2. Análisis de confiabilidad de los modelos de pérdida por trayectoria

Con el objetivo de predecir el efecto de la incertidumbre de medición sobre el funcionamiento del PS, es necesario conocer la tendencia del error de estimación entre los puntos de prueba y los puntos aproximados por el PS. En este contexto, mediante la información de los valores de la variable RSSI de cada enlace entre el nodo objetivo y el nodo ancla, y con la ayuda de la desviación estándar de la variable RSSI obtenida de cada punto de medición con salto de 10 m en el rango de $10 - 200\text{ m}$ en el procedimiento de caracterización (Figura 5.3), es posible crear un conjunto de simulaciones para conocer el comportamiento del error de estimación. Específicamente se evalúan los puntos de prueba para escenarios con dimensión de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, $90\text{ m} \times 90\text{ m}$, $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ y $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ de acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.9. Cada uno de los escenarios requiere de puntos de prueba que se indican en las Tablas 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13. La Figura 5.5 ilustra los puntos de prueba para cada uno de los escenarios de medición.

ID	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}
x (m)	21.21	42.42	38.78	30	17.57
y (m)	21.21	42.42	21.21	30	42.42

Tabla 5.10: Puntos para el escenario con dimensión de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$.

ID	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
x (m)	35.35	56.56	54.64	45	33.43
y (m)	35.35	56.56	35.35	45	56.56

Tabla 5.11: Puntos para el escenario con dimensión de $90\text{ m} \times 90\text{ m}$.

ID	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}
x (m)	63.63	84.85	86.36	75	65.14
y (m)	63.63	84.85	63.63	75	84.85

Tabla 5.12: Puntos para el escenario con dimensión de $150\text{ m} \times 150\text{ m}$.

Por otra parte, la Figura 5.6 muestra el resultado de simular 10 veces el funcionamiento del PS, usando un punto de prueba por cada uno de los escenarios.

La Figura 5.7 muestra el error promedio de simulación de cada punto en cada uno de los escenarios.

ID	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}
x (m)	77.78	127.27	122.21	100	72.72
y (m)	77.78	127.27	77.78	100	127.27

Tabla 5.13: Puntos para el escenario con dimensión 200 m×200 m.

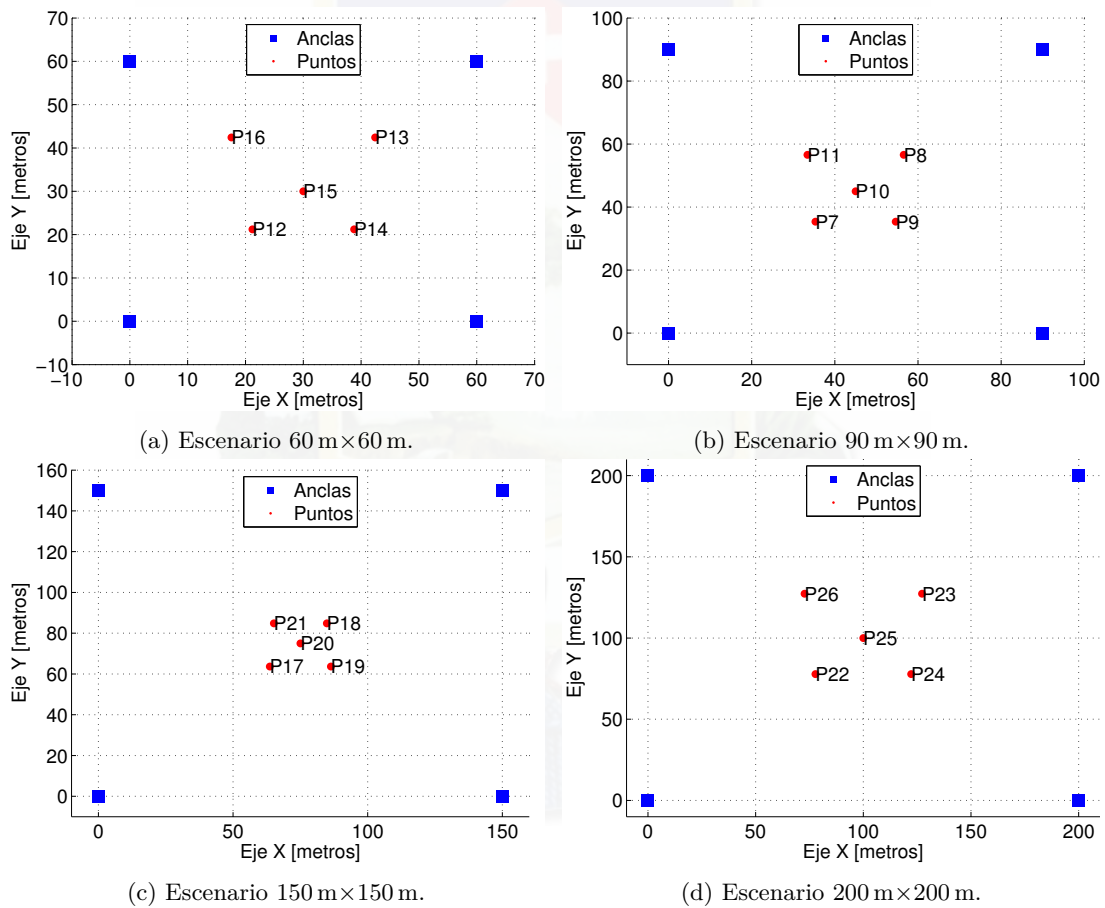


Figura 5.5: Puntos de prueba para cada uno de los escenarios de medición.

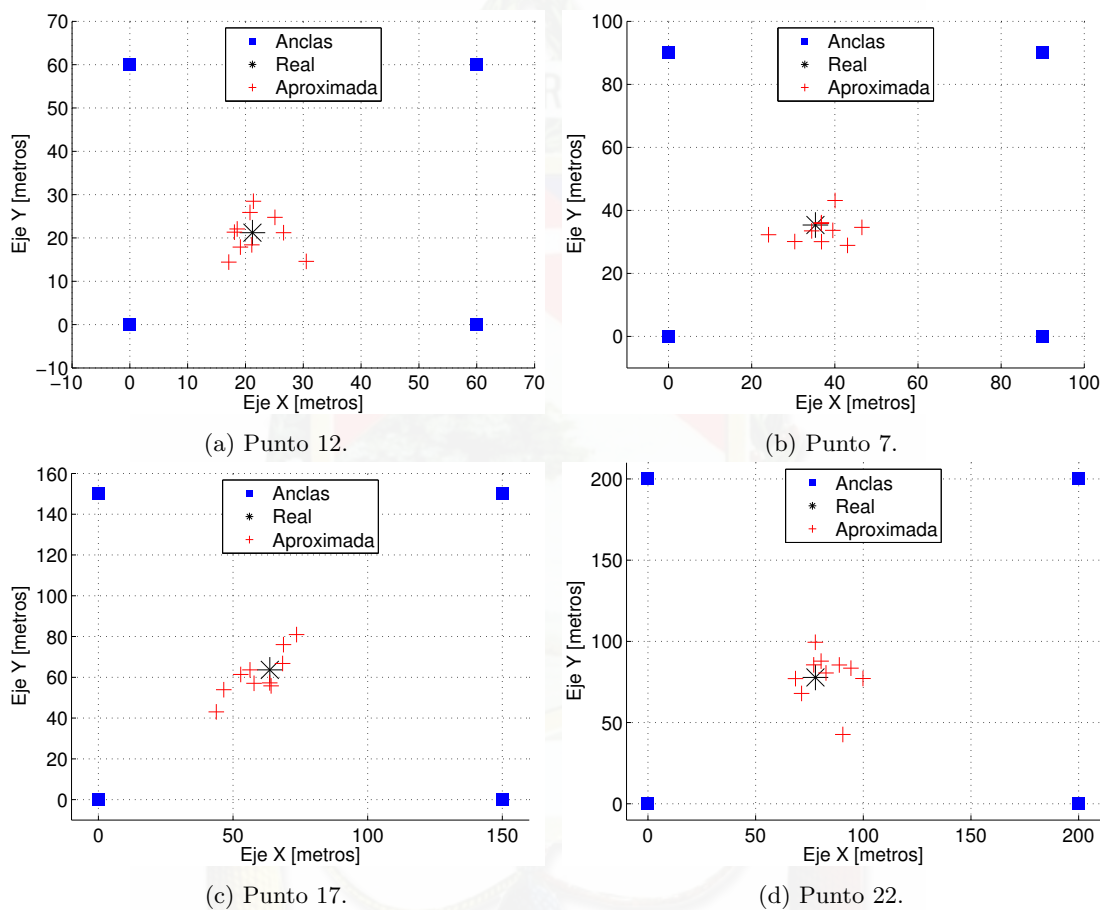


Figura 5.6: Simulación del funcionamiento del PS.

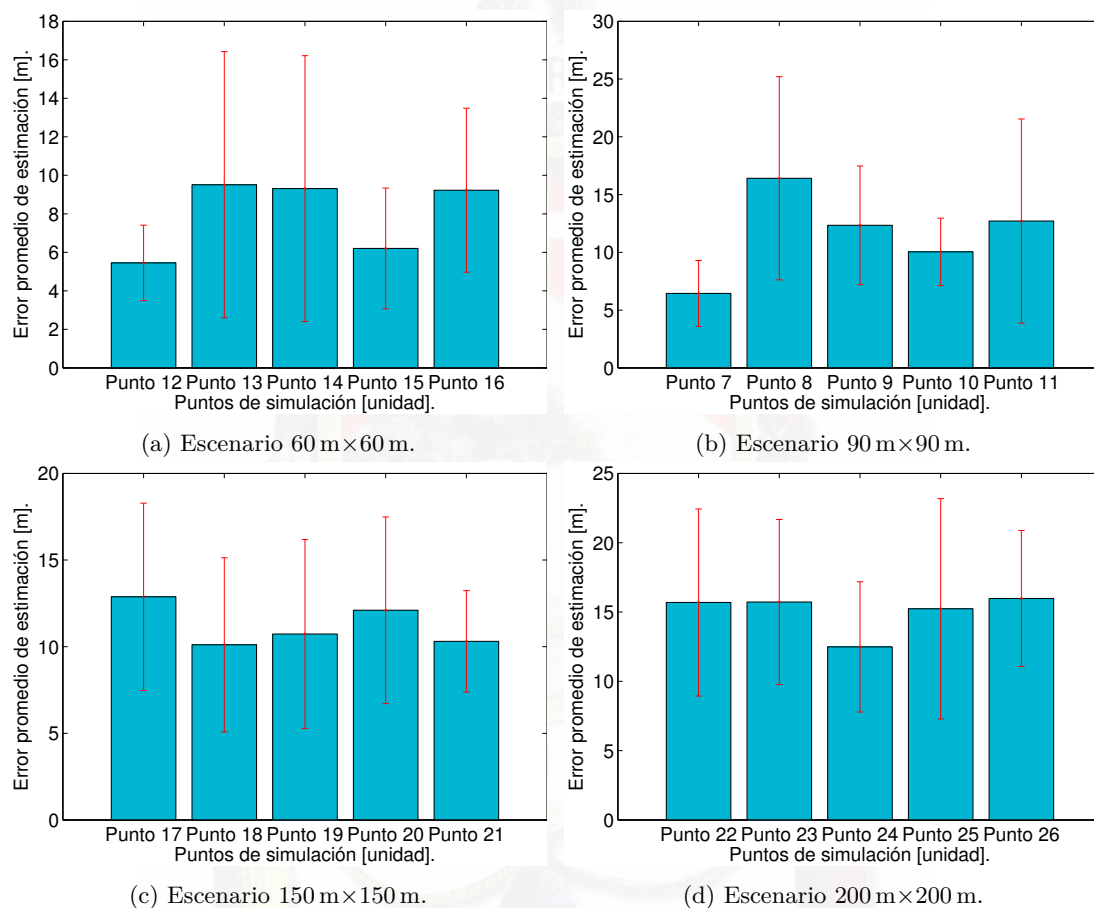


Figura 5.7: Error promedio de los puntos de simulación.

La Tabla 5.14 presenta un resumen de los errores promedios para cada uno de los escenarios de la Figura 5.7. Se incluye también el porcentaje de error, por ejemplo, para el escenario con dimensión de 60 m×60 m se tiene un error promedio de 7.94 m que corresponde al 9.35 %. Este porcentaje considera como 100 % a la máxima distancia posible (84.85 m para este caso) que es la diagonal del escenario cuadrado. Es importante, destacar que de acuerdo a las simulaciones, la incertidumbre en las mediciones afecta al funcionamiento del PS en un 7.42 % aproximadamente considerando todos los escenarios.

Escenario	60 m×60 m	90 m×90 m	150 m×150 m	200 m×200 m
\bar{e} (m)	7.94	11.58	11.22	16.90
(%)	9.35	9.10	5.29	5.97

Tabla 5.14: Error promedio de simulación para cada escenario.

5.2.4.3. Pruebas 1 y 2

De la prueba 1, los nodos ancla con identificadores: A , B , C y D de la Tabla 5.9 forman el Escenario 1 de la Tabla 5.1; y tienen las respectivas posiciones fijas (0,0), (0,60), (60,60) y (60,0). Por otra parte, la Tabla 5.10 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 1 y estimar la ubicación del objetivo. De esta manera, la Tabla 5.15 muestra el error de estimación que tiene el PS en cada uno de los enlaces: de ida (e_1), de vuelta (e_2) y de ida y vuelta (e_3). Además, la prueba 1 cuenta con 4 nodos ancla, por lo tanto, tiene 5 posibles estimaciones según la Tabla 5.7.

e_{enlace}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	9.93	17.95	14.67	1.13	11.74	11.08	13.06
e_2 (m)	6.87	16.33	10.39	2.20	10.12	9.18	10.82
e_3 (m)	10.21	17.91	14.79	1.73	10.08	10.94	12.90

Tabla 5.15: Error de estimación de la prueba 1 de la tercera campaña de medición.

Adicionalmente, la Tabla 5.15 se verifica que el mejor uso del valor de la variable RSSI es en el enfoque de vuelta, debido a que presenta el menor error de estimación promedio. Por otra parte, los identificadores de la prueba 2: A , B , C , D y E de la Tabla 5.9 forman el Escenario 1 de la Tabla 5.1 de 5 nodos ancla; y tienen las respectivas posiciones fijas (0,0), (0,60), (60,60), (60,0) y (30,30). Por otra parte, la Tabla 5.10 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 2 y estimar la ubicación del objetivo. En cambio, la Tabla 5.16 muestra el error de estimación que tiene el PS. Además, la prueba 2 cuenta con 5 nodos ancla, por lo tanto, tiene 16 posibles estimaciones según la Tabla 5.7.

También, en la Tabla 5.16 se verifica que el mejor uso del valor de la variable RSSI es en el enfoque de vuelta, debido a que presenta el menor error de estimación promedio. Además, aumentar una ancla más al PS no ayuda a reducir el error de estimación.

e_{enlace}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{16}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	11.98	17.50	13.50	11.41	13.60	16.03
e_2 (m)	10.95	17.40	3.76	8.37	10.12	11.93
e_3 (m)	11.41	17.38	7.97	9.76	11.63	13.71

Tabla 5.16: Error de estimación de la prueba 2 de la tercera campaña de medición.

5.2.4.4. Pruebas 3 y 4

En la prueba 3, los nodos ancla con identificadores: A , B , C y D de la Tabla 5.9 forman el Escenario 2 de la Tabla 5.1 con el chip *Semtech* [37] *SX1272*; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$ y $(90, 0)$. Por otra parte, la Tabla 5.11 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 3 y estimar la ubicación del objetivo. En cambio, la Tabla 5.17 muestra el error de estimación que tiene el PS. Además, la prueba 3 cuenta con 4 nodos ancla, por lo tanto, tiene 5 posibles estimaciones.

e_{enlace}	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	7.44	11.05	22.30	26.07	23.22	18.01	14.15
e_2 (m)	8.19	8.54	12.60	1.36	12.06	8.55	6.72
e_3 (m)	7.49	10.84	21.61	18.27	19.89	15.62	12.27

Tabla 5.17: Error de estimación de la prueba 3 de la tercera campaña de medición.

En la Tabla 5.17 es evidente que el mejor uso del valor de la variable RSSI es en el enfoque de vuelta, debido a que presenta el menor error de estimación promedio; y además el escenario con dimensiones de $90\text{m} \times 90\text{m}$ presenta el mejor funcionamiento del PS. Por otra parte, los identificadores de la prueba 4: A , B , C , D y E de la Tabla 5.9 forman el Escenario 2 de la Tabla 5.1 de 5 nodos ancla; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0, 0)$, $(0, 90)$, $(90, 90)$, $(90, 0)$ y $(45, 45)$. Por otra parte, la Tabla 5.11 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 4 y estimar la ubicación del objetivo. En cambio, la Tabla 5.18 muestra el error de estimación que tiene el PS.

e_{enlace}	P_7	P_8	P_9	P_{11}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	23.66	11.01	21.85	22.65	19.79	15.55
e_2 (m)	27.41	9.62	14.78	13.61	16.35	12.85
e_3 (m)	23.64	10.83	22.71	18.92	19.02	14.95

Tabla 5.18: Error de estimación de la prueba 4 de la tercera campaña de medición.

De la Tabla 5.18 se verifica que el mejor uso del valor de la variable RSSI es en el enfoque de vuelta, debido a que presenta el menor error de estimación promedio. Además, aumentar una ancla al PS no ayuda a reducir el error de estimación.

5.2.4.5. Pruebas 5 y 6

De la prueba 5, los nodos ancla con identificadores: A , B , C y D de la Tabla 5.9 forman el Escenario 3 de la Tabla 5.1 de 4 nodos ancla con dispositivos con el mismo chip *Semtech*[37] *SX1272*; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0,0)$, $(0,150)$, $(150,150)$ y $(150,0)$. Por otra parte, la Tabla 5.12 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 5 y estimar la ubicación del objetivo. En cambio, la Tabla 5.19 muestra el error de estimación que tiene el **PS**. Además, la prueba 5 cuenta con 4 nodos ancla, por lo tanto, tiene 5 posibles estimaciones.

e_{enlace}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	9.57	10.74	10.96	13.59	15.66	12.11	5.70
e_2 (m)	19.03	18.04	12.96	22.91	29.85	20.56	9.69
e_3 (m)	12.69	14.18	11.73	22.91	22.19	16.74	7.89

Tabla 5.19: Error de estimación de la prueba 5 de la tercera campaña de medición.

Adicionalmente, la Tabla 5.19 es evidente que el mejor uso del valor de la variable **RSSI** es en el enfoque de ida. Por otra parte, los identificadores de la prueba 6: A , B , C , D y E de la Tabla 5.9 forman el Escenario 3 de la Tabla 5.1 de 5 nodos ancla; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0,0)$, $(0,150)$, $(150,150)$, $(150,0)$ y $(75,75)$. Por otra parte, la Tabla 5.12 muestra los puntos de prueba elegidos para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario de prueba 6 y estimar la ubicación del objetivo. En cambio, la Tabla 5.20 muestra el error de estimación que tiene el **PS**. Además, la prueba 6 cuenta con 5 nodos ancla, por lo tanto, tiene 16 posibles estimaciones según la Tabla 5.7.

e_{enlace}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{21}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	14.65	11.05	11.48	6.02	10.80	5.09
e_2 (m)	9.36	17.90	13.33	12.80	13.35	6.29
e_3 (m)	10.99	14.25	12.19	6.86	11.07	5.22

Tabla 5.20: Error de estimación de la prueba 6 de la tercera campaña de medición.

De la Tabla 5.20 se verifica que el mejor uso del valor de la variable **RSSI** es en el enfoque de vuelta, debido a que presenta el menor error de estimación promedio. Además, aumentar una ancla más al **PS** no ayuda a reducir el error de estimación.

5.3. Resultados del sistema de posicionamiento

Ejemplos específicos para los escenarios simétricos y no simétricos con la interfaz gráfica realizada en *MATLAB* para visualizar la ubicación del objetivo.

5.3.1. Escenarios simétricos

Ejemplo de la tercera campaña de medición, específicamente de para el P_{11} de la prueba 2 indicado en la Tabla 5.11. En la Figura 5.8 se muestra la interfaz gráfica resultante para el enfoque de vuelta.

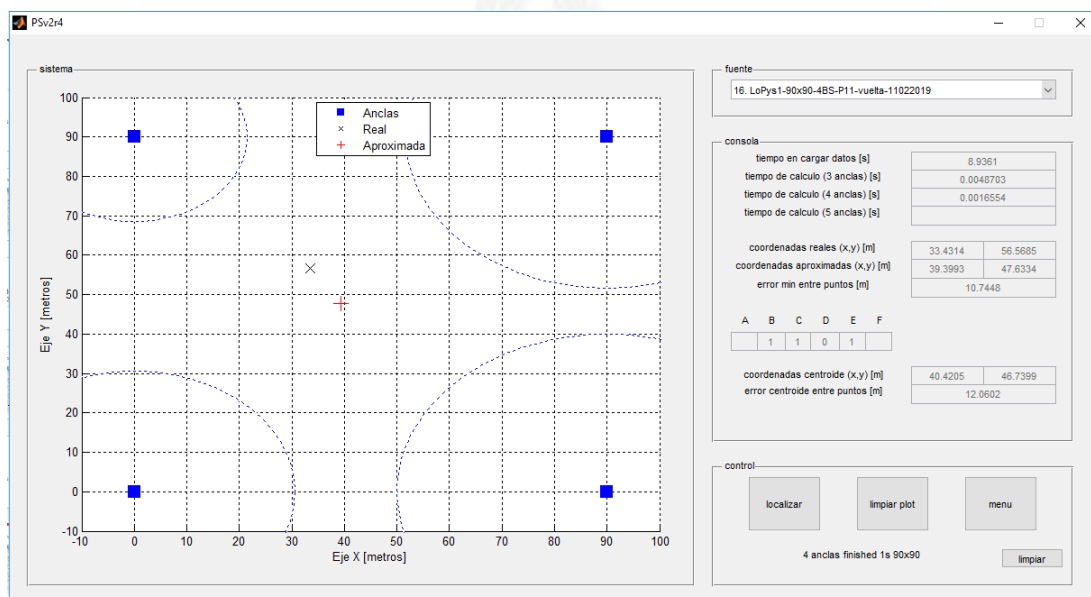


Figura 5.8: Interfaz gráfica del PS para escenarios simétricos.

La interfaz gráfica de la Figura 5.8 se divide en 4 áreas: (1) Sistema, que indica las posiciones de los nodos ancla y el nodo objetivo en un plano cartesiano, con su posición real y estimada en dos dimensiones; (2) Fuente, accede a la base de datos de los conjuntos de pruebas y selecciona una para análisis; (3) Consola, presenta información de interés para análisis como: tiempos en cargar datos de la prueba, tiempo de cálculo de los algoritmos de localización trilateración para 3, 4 y 5 nodos ancla, coordenadas (x, y) punto mínimo del conjunto de estimaciones, error punto mínimo, coordenadas (x, y) punto centroide del conjunto de estimaciones y error punto centroide; y (4) Control, se divide en tres botones que interactúan con el usuario: el botón localizar realiza todo el cálculo de localización, el botón limpiar realiza una limpieza de toda la pantalla para analizar una nueva prueba y el botón menú cierra la pantalla actual y presenta la pantalla de bienvenida del PS donde se puede seleccionar entre escenarios simétricos o no simétricos. Además, el PS genera una figura que muestra todo el conjunto de estimaciones en este caso 5 posibles estimaciones según la Tabla 5.7 (véase Figura 5.9).

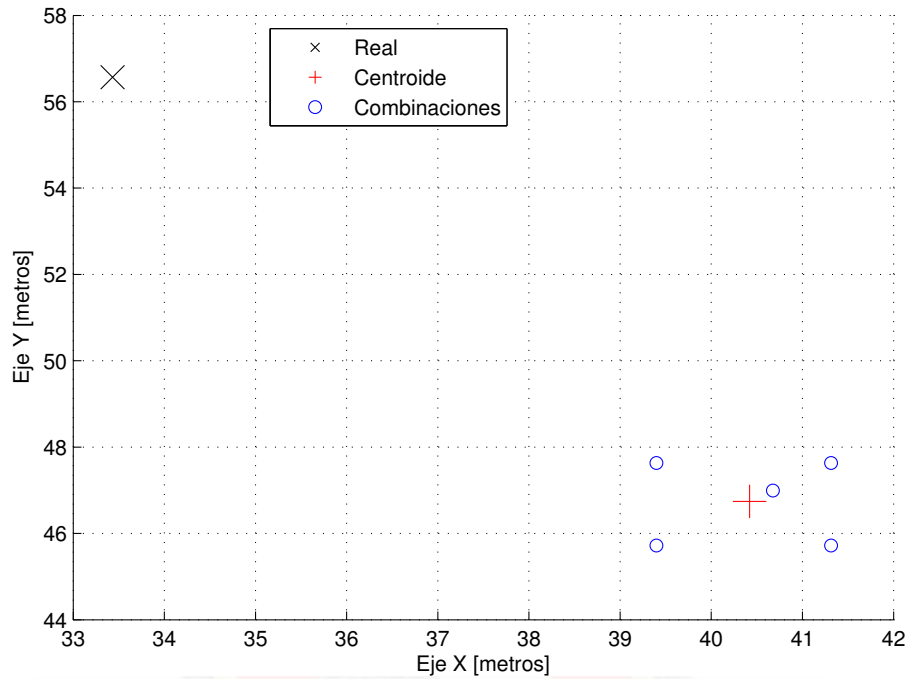


Figura 5.9: Conjunto de posibles estimaciones.

5.3.2. Escenarios no simétricos

Ejemplo de la segunda campaña de medición, para los Escenarios 4 y 5 de la Tabla 5.1, hay que destacar que la segunda campaña presentó problemas de mal funcionamiento, como por ejemplo: mala conexión de las antenas de algunos nodos. Por otra parte, la Figura 5.10 muestra el resultado del botón menú de la Sección 5.3.1 que presenta la interfaz de usuario de bienvenida del PS, para las pruebas de los escenarios 4 y 5 se debe seleccionar el botón no simétrico.

5.3.2.1. Escenario 4

Los identificadores de la prueba con el escenario 4: A , B , C , D , E y F de la Tabla 5.5 forman un escenario no simétrico con dispositivos FiPy y LoPy; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0, 100)$, $(90, 0)$, $(35, -35)$, $(50, 50)$, $(0, -80)$ y $(-45, 45)$. el punto de prueba $P_5 = (0, 0)$ es elegido para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario 4 y estimar la ubicación del objetivo. La Figura 5.11a muestra la interfaz resultante para el enfoque de vuelta.

Por otra parte, la Tabla 5.21 para el Escenario 4 muestra el error de estimación (\bar{e}_4) que tiene el PS, donde se aprecia un error alto debido a que dentro del conjunto de 42 posibles estimaciones existen estimaciones que introducen error al punto centroide. A pesar, de filtrar los malos comportamientos se obtiene este error debido a que el escenario tiene el objetivo de

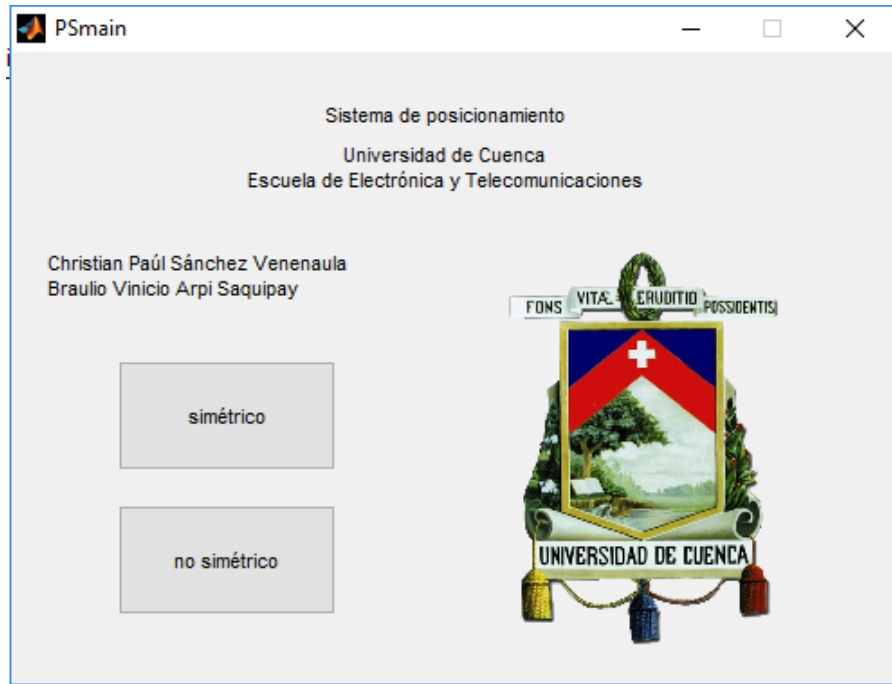


Figura 5.10: Interfaz de bienvenida del PS.

poner los nodos ancla a distancias lejanas de 100 m que introducen error.

$\bar{e}_{escenario}$	P_5
\bar{e}_4 (m)	25.49
\bar{e}_5 (m)	9.93

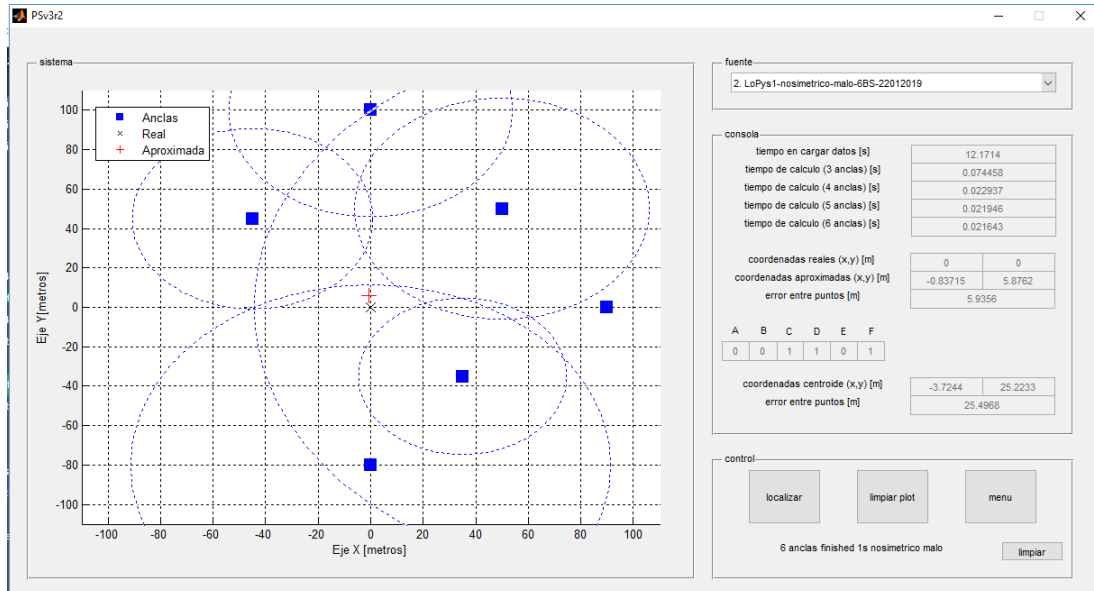
Tabla 5.21: Error de estimación para los Escenarios 4 y 5 de la Tabla 5.1.

Además, La Figura 5.12a muestra el conjunto de posibles estimaciones para 6 nodos ancla, pero como se aplica el filtro de mal comportamiento se elimina algunos nodos ancla del conjunto.

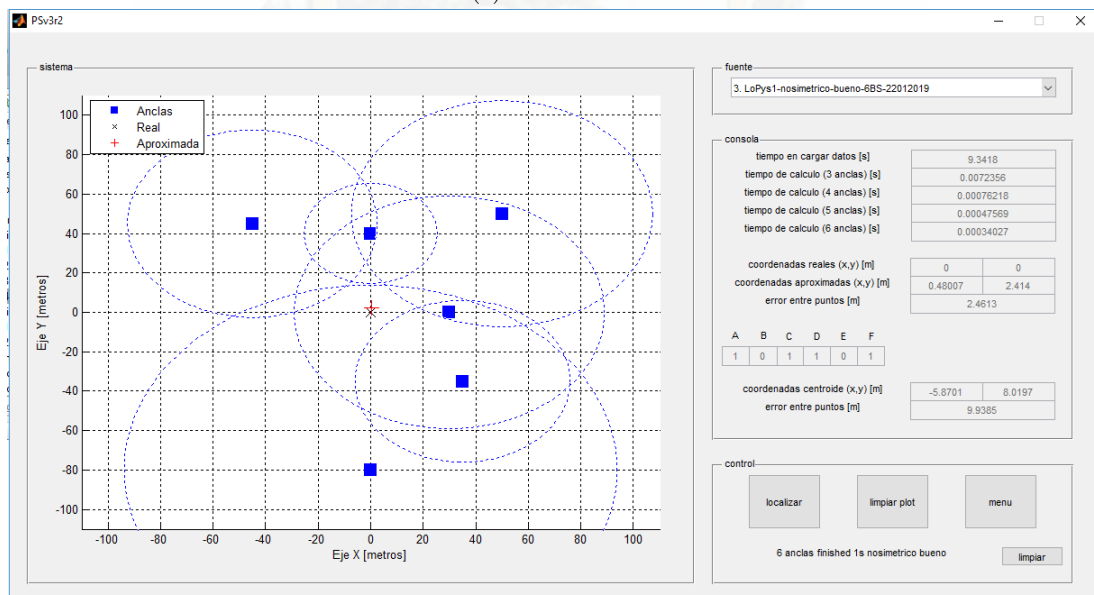
5.3.2.2. Escenario 5

Los identificadores de la prueba con el escenario 5: A , B , C , D , E y F de la Tabla 5.5 forman un escenario no simétrico con dispositivos FiPy y LoPy; y tienen las respectivas posiciones fijas $(0, 40)$, $(30, 0)$, $(35, -35)$, $(50, 50)$, $(0, -80)$ y $(-45, 45)$. el punto de de prueba $P_5 = (0, 0)$ es elegido para ubicar al nodo objetivo dentro del escenario 5 y estimar la ubicación del objetivo. La Figura 5.11b muestra la interfaz resultante para el enfoque de vuelta.

Por otra parte, la Tabla 5.21 para el Escenario 5 muestra el error de estimación (\bar{e}_5) que tiene el PS. Donde se aprecia una reducción del error debido a que dentro del conjunto de 42 posibles estimaciones ya no existen estimaciones que introducen error al punto centroide.



(a) Escenario 4.



(b) Escenario 5.

Figura 5.11: Interfaz gráfica del PS para los escenarios no simétricos.

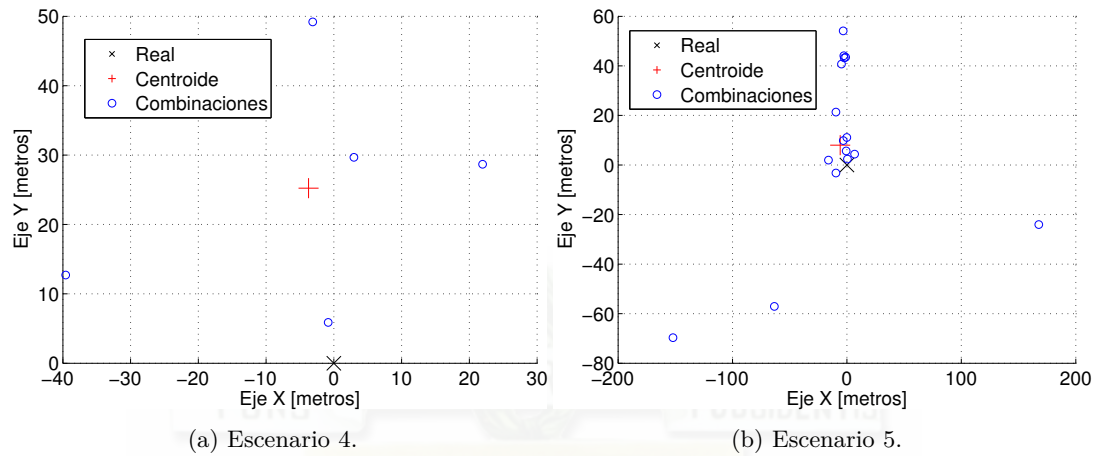


Figura 5.12: Conjunto de posibles estimaciones para los escenarios no simétricos.

Además, la Figura 5.12b muestra el conjunto de posibles estimaciones para 6 nodos ancla, pero como se aplica el filtro de mal comportamiento se elimina algunos nodos ancla del conjunto.

5.4. Análisis de resultados

Es necesario analizar los errores de estimación de las campañas de medición con los de simulación con el objetivo de identificar el mejor escenario para el PS debido a los dispositivos de bajo costo usados; y comparar el mejor escenario con resultados obtenidos de trabajos similares.

5.4.1. Análisis campañas de medición

La Figura 5.13 muestra el error de estimación para cada una de las pruebas realizadas durante las campañas de medición; y el porcentaje de error respecto a la máxima distancia posible para determinada medición. Por otra parte, la Tabla 5.22 muestra la descripción de cada una de las mediciones realizadas.

De acuerdo al análisis preliminar de la Sección 5.2 es evidente que el enfoque del uso de la variable RSSI, depende de un previo análisis de resultados para determinar cuál es el mejor enfoque de ida, vuelta o ida y vuelta. Además, de acuerdo a la Tabla 5.22 y la Figura 5.13 se observa tres principales resultados: (1) Para un escenario con dimensión de 60 m×60 m con 4 o 5 nodos ancla se tiene un mal comportamiento debido a que los dispositivos LoRa tienen mal comportamiento a distancias cercanas; (2) Para un escenario con dimensión de 90 m×90 m solo con 4 nodos ancla el error de estimación es reducido; y (3) Para un escenario con dimensión de 150 m×150 m con 4 o 5 nodos ancla el error de estimación es reducido. En este contexto, los

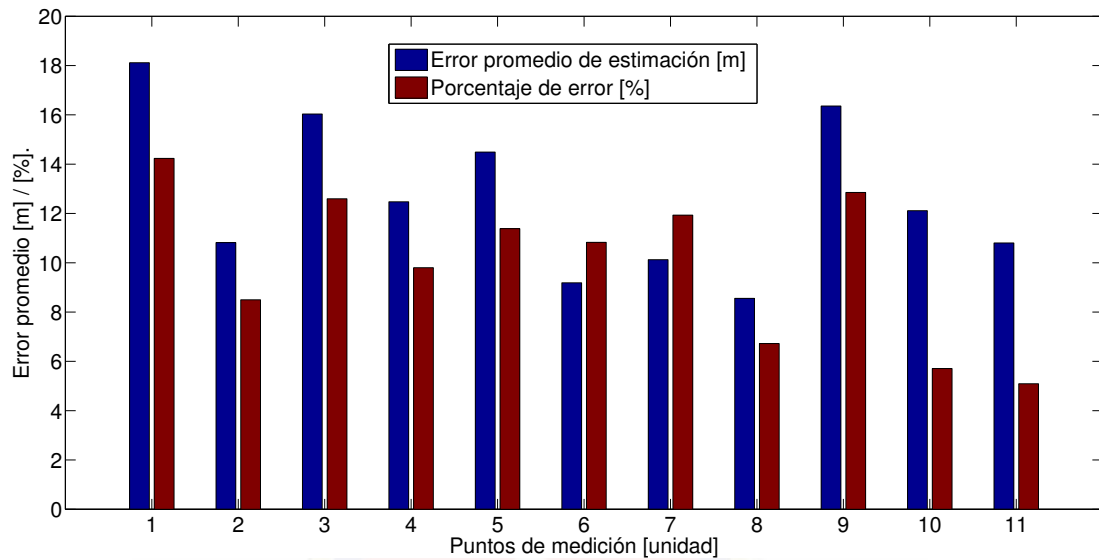


Figura 5.13: Error de estimación de las pruebas de las campañas de medición.

Medición	Descripción
1	Escenario híbrido de 90 m×90 m con 3 nodos ancla perteneciente a la primera campaña; y analizando el enfoque de vuelta.
2	Escenario híbrido de 90 m×90 m con 4 nodos ancla perteneciente a la segunda campaña con mal funcionamiento; y analizando el enfoque de vuelta.
3	Escenario híbrido de 90 m×90 m con 5 nodos ancla perteneciente a la segunda campaña con mal funcionamiento; y analizando el enfoque de vuelta.
4	Escenario no híbrido de 90 m×90 m con 4 nodos ancla perteneciente a la segunda campaña con mal funcionamiento; y analizando el enfoque de vuelta.
5	Escenario no híbrido de 90 m×90 m con 5 nodos ancla perteneciente a la segunda campaña con mal funcionamiento; y analizando el enfoque de vuelta.
6	Escenario no híbrido de 60 m×60 m con 4 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de vuelta.
7	Escenario no híbrido de 60 m×60 m con 5 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de vuelta.
8	Escenario no híbrido de 90 m×90 m con 4 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de vuelta.
9	Escenario no híbrido de 90 m×90 m con 5 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de vuelta.
10	Escenario no híbrido de 150 m×150 m con 4 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de ida.
11	Escenario no híbrido de 150 m×150 m con 5 nodos ancla perteneciente a la tercera campaña con mitigación de errores; y analizando el enfoque de ida.

Tabla 5.22: Mediciones de todas las campañas.

escenarios con dimensión de $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ y $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ son adecuados para el funcionamiento del PS basado en el algoritmo de posicionamiento RSSI y localización trilateración.

Por otra parte, es necesario comparar el error de estimación de la simulación versus mediciones reales. La Figura 5.14 muestra la comparación de errores de estimación para los escenarios de dimensión de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ y $150\text{ m} \times 150\text{ m}$. Se observa que los resultados de simulación coinciden con las mediciones reales, por lo tanto, es posible utilizar el procedimiento de simulación para predecir el comportamiento del PS en la vida real.

5.4.2. Análisis trabajos similares

Es importante evaluar el comportamiento del PS del presente trabajo de titulación con otros trabajos similares.

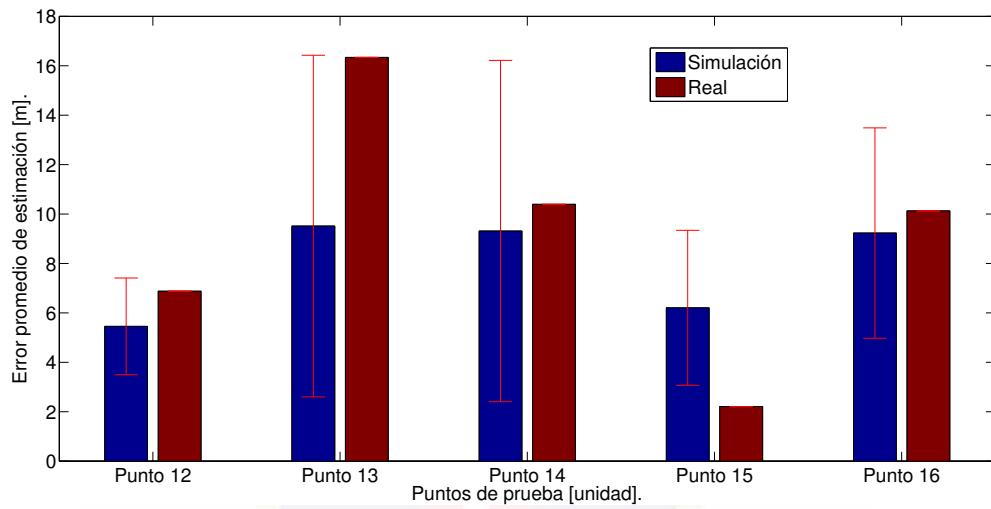
5.4.2.1. Comparación 1

Los autores en [52] utilizan la sensibilidad RSSI incorporada en los dispositivos para monitorear el exterior rural de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ con LoS. Este trabajo utiliza tecnología Zigbee, 4 estaciones base XBeePro y un nodo objetivo XBee ubicado en la tortuga. Además, el algoritmo de localización IGBA que crea una matriz de valores basados en la información del RSSI para localizar al objetivo, comúnmente utilizado en escenarios interiores. Mientras mayores sean los puntos de medición dentro del escenario, mayor será la exactitud de la localización del objetivo. Por lo tanto, este enfoque con la técnica IGBA no es escalable para escenarios con mayor dimensión. El trabajo presenta únicamente errores promedio de estimación de las coordenadas x de 3.2 m y y de 4.3 m , no calcula el error entre el punto real y el punto estimado. Para obtener una mejor comparación, la Tabla 5.23 muestra los puntos de prueba reales y puntos estimados. Con esta información es posible realizar el cálculo del error mediante la fórmula de la distancia entre dos puntos, real y estimado respectivamente.

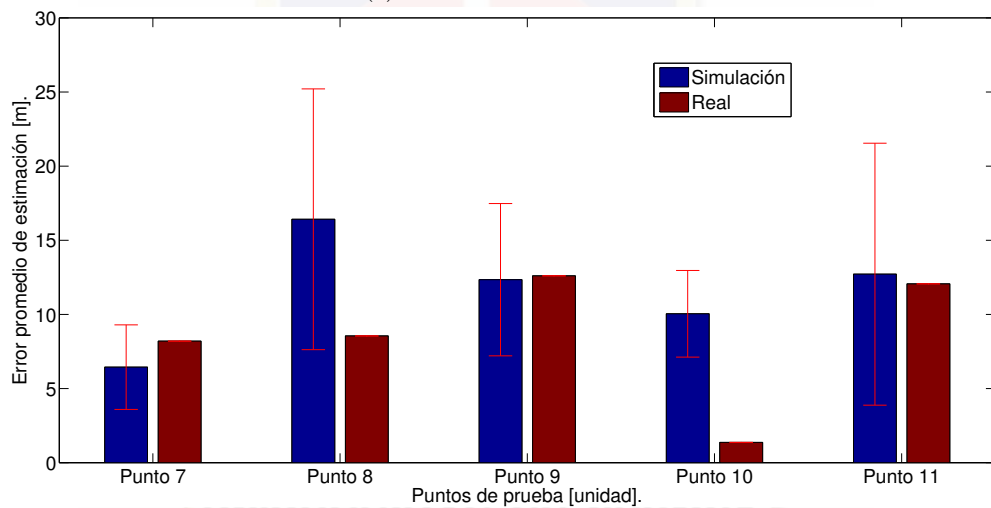
Punto	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
x_r (m)	45	30	15	15	20	30	30
y_r (m)	15	15	15	30	30	30	45
\tilde{x}_e (m)	49.57	27.14	12.85	14.71	22.22	24.28	26.28
\tilde{y}_e (m)	17.69	15.76	11.15	24.61	21.53	21.53	41.73
\bar{e} (m)	5.30	2.95	4.40	5.39	8.75	10.21	4.94

Tabla 5.23: Puntos reales, estimados y error de estimación.

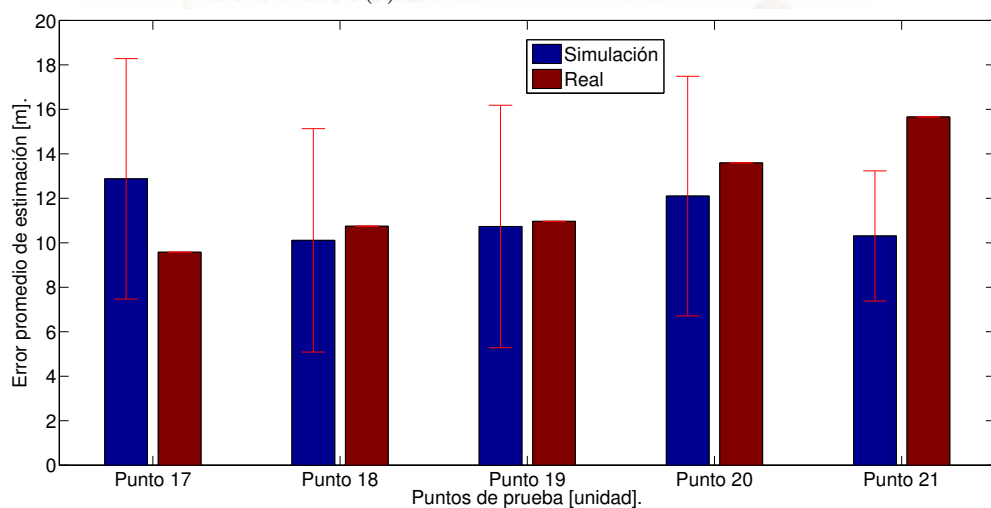
Por lo tanto, analizando los resultados del trabajo, como se muestra en la Tabla 5.23 se obtiene un error de estimación promedio de 5.99 m correspondiente al 7.06% en un escenario con dimensión de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$. En comparación con el presente trabajo de titulación en un escenario de la misma dimensión, tiene un error de estimación promedio de 10.97 m correspondiente al



(a) Escenario 60 m × 60 m.



(b) Escenario 90 m × 90 m.



(c) Escenario 150 m × 150 m.

Figura 5.14: Comparación errores de simulación versus mediciones reales.

12.93 %, es mejor con aproximadamente 6 %. La razón de los malos resultados es debido a que los dispositivos LoRa del presente trabajo de titulación tienen mal comportamiento a distancias cercanas. Por otra parte, el método de localización IGBA utilizado en [52] no permite una rápida escalabilidad a escenarios de mayor dimensión debido a que necesita tomar la mayor cantidad de muestras para cada escenario, en comparación con el PS diseñado e implementado en este trabajo de titulación que solo requiere de un procedimiento de caracterización antes del funcionamiento del PS.

5.4.2.2. Comparación 2

Del mismo modo, los autores en [15] utilizan la sensibilidad RSSI y la característica ToF incorporada en los dispositivos con módulos NXP JN5148 de tecnología Zigbee. El trabajo solo analiza un punto de prueba ubicado en el centro del escenario de medición que según las investigaciones es el punto que proporciona los mejores resultados. Tiene una exactitud promedio de 0.89 m correspondiente al 7.20 % usando RSSI y 2.51 m correspondiente al 20.28 % usando ToF en un escenario interior de 10.55 m×22.48 m, y una exactitud promedio de 0.60 m correspondiente al 0.85 % usando RSSI y 1.98 m correspondiente al 2.80 % usando ToF en un escenario exterior rural de 50 m×50 m. La Tabla 5.24 muestra una comparación con el punto de prueba central del presente trabajo de titulación.

Fuente	Escenario	Método	\bar{e} (m)	(%)
[15]	10.55 m×22.48 m	RSSI	0.89	7.20
[15]	10.55 m×22.48 m	ToF	2.51	20.28
[15]	50 m×50 m	RSSI	0.60	0.85
[15]	50 m×50 m	ToF	1.98	2.80
Trabajo de titulación	60 m×60 m	RSSI	2.20	2.60
Trabajo de titulación	90 m×90 m	RSSI	1.36	1.07
Trabajo de titulación	150 m×150 m	RSSI	13.59	6.41

Tabla 5.24: Comparación del presente trabajo de titulación con [15].

De la Tabla 5.24 se puede observar que el presente trabajo de titulación tiene mejores resultados debido a que en su análisis solo ocupa 4 nodos ancla. En cambio, los autores en [15] ocupan 8 nodos ancla para obtener el mismo resultado con un costo de implementación y computacional mayor.

5.4.2.3. Comparación 3

Por otro parte, los autores en [54] utilizan tecnología Zigbee para escenarios interiores de 3 m×3 m. La propuesta depende de dos etapas, la primera etapa consiste de un reconocimiento del escenario para crear una clasificación estadística de valores de la variable RSSI. La segunda etapa consiste en mediciones para estimar la distancia. El PS tiene una exactitud promedio de

0.31 m correspondiente al 7.47 % en tres escenarios interiores ubicados en un pasillo, corredor y aire libre. En este contexto, el presente trabajo de titulación presenta mejores porcentajes de error de 6.72 % y 5.09 % para los escenarios de 90 m×90 m y 150 m×150 m respectivamente. Por lo tanto es mejor comparando el porcentaje de error del PS.

5.4.3. Análisis eficiencia del sistema de posicionamiento

La eficiencia del PS se divide en dos consideraciones importantes: (1) Respecto a la exactitud en la localización; y (2) Respecto al tiempo de procesamiento. La exactitud del PS es de 8.55 m y 10.80 m para los escenarios de 90 m×90 m y 150 m×150 m respectivamente. En cambio, la Tabla 5.25 muestra el tiempo de procesamiento desglosado en eventos importantes al realizar una solicitud de localización, por ejemplo: cargar la base de datos, calcular algoritmo de localización 3, 4 y 5 nodos ancla; y con esto conocer el tiempo promedio de repuesta del PS. El tiempo promedio para cada evento se obtiene evaluando un punto particular del PS 10 veces y realizando el promedio de los tiempos.

Evento	t (ms)
Tiempo de creación de base de datos	7772.8
Algoritmo de localización para 3 nodos ancla	10.32
Algoritmo de localización para 4 nodos ancla	0.55
Algoritmo de localización para 5 nodos ancla	0.35
Filtrado, figuras, etc	1060.64
Tiempo de procesamiento total	8844.6

Tabla 5.25: Tiempo de procesamiento de un punto particular.

5.4.4. Fiabilidad del sistema de posicionamiento

Es necesario probar el PS en el escenario 3 de la Tabla 4.6. Siguiendo el procedimiento de diseño e implementación del PS detallado en el Capítulo 4. Para comprobar la fiabilidad del presente trabajo de titulación, es decir, que los resultados de la tercera campaña de medición se repiten en otros ambientes. En este contexto, la Tabla 5.26 muestra los resultados de probar el PS en un escenario con dimensión de 90 m×90 m de 4 nodos ancla en la hacienda Irquis. Utilizando los identificadores A, B, C y D de la Tabla 5.9.

\bar{e}_{enlace}	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	17.96	8.92	28.70	10.02	7.82	14.68	11.54
e_2 (m)	13.21	13.52	17.21	4.29	9.86	11.62	9.13
e_3 (m)	18.81	26.73	30.19	7.99	6.21	17.99	14.13

Tabla 5.26: Error de estimación del escenario de 90 m×90 m con 4 nodos ancla en la hacienda Irquis.

Por otra parte, la Tabla 5.27 muestra los resultados de probar el PS en un escenario con dimensión de 90 m×90 m de 5 nodos ancla. Utilizando los identificadores *A*, *B*, *C*, *D* y *E* de la Tabla 5.9.

\bar{e}_{enlace}	P_7	P_8	P_9	P_{11}	\bar{e} (m)	(%)
e_1 (m)	17.89	17.11	29.41	8.29	18.17	14.28
e_2 (m)	13.12	14.63	17.75	9.82	13.83	10.86
e_3 (m)	17.85	26.93	30.76	6.84	20.60	16.18

Tabla 5.27: Error de estimación del escenario de 90 m×90 m con 5 nodos ancla en la hacienda Iruquis.

De acuerdo a la Tabla 5.9 se tiene un error de estimación de 11.62 m correspondiente al 9.13 % en un escenario con 4 nodos ancla. Por otra parte, según la Tabla 5.27 se tiene un error de estimación de 13.83 m correspondiente al 10.86 % en un escenario con 5 nodos ancla. Debido a que el PS presenta resultados similares a las pruebas realizadas en la tercera campaña de medición, es posible decir que el presente trabajo de titulación es fiable.

5.5. Conclusiones

De acuerdo a los problemas presentados en las primeras campañas de medición sobre factores de mal comportamiento que introducen error en el PS, se observó la necesidad de mitigar estos problemas mediante nuevos enfoques de caracterización, filtros de mal comportamiento, utilizar dispositivos FiPy y LoPy con buen sensor RSSI que ayudan al buen funcionamiento del PS. Por lo tanto, se recomienda usar el PS en cualquiera de los dos mejores escenarios con dimensión de 90 m×90 m y 150 m×150 m respectivamente.

De la comparación con trabajos similares se puede decir que el PS diseñado e implementado en el presente trabajo de titulación es mejor debido a que es escalable a escenarios con otras dimensiones y con otro número de nodos ancla. Además, presenta buenos resultados usando pocos nodos ancla, por lo tanto es posible mejorar los resultados aumentando nodos ancla.

Por otra parte, debido a que los resultados entre el error promedio de estimación de la posición con mediciones *in situ* versus simulaciones son similares para cada uno de los escenarios de medición. Es posible utilizar el procedimiento de simulación para crear escenarios y simular el comportamiento del PS para evitar costos y tiempo de implementación. Además, tener un algoritmo de simulación permite probar distintos escenarios para futuras implementaciones de localización que no requieran de alta precisión en sus resultados.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presenta las conclusiones del trabajo de titulación, al igual que las recomendaciones para futuros trabajos similares. De acuerdo al análisis de resultados efectuado en el Capítulo 5 sobre los problemas de mal funcionamiento y medidas correctivas para obtener el correcto funcionamiento del sistema de posicionamiento. Finalmente, se propone ideas para ampliar el trabajo de titulación.

6.1. Conclusiones

El principal proceso en el diseño del sistema de posicionamiento consiste en analizar la parte teórica de los mismos, para conocer acerca de su arquitectura, fuentes de error, algoritmos comunes de estimación de la posición, algoritmos de posicionamiento **ToA**, **TDoA**, **AoA** y **RSSI**, y sus algoritmos de localización por multilateración, triangulación y trilateración. Con esta información se define los requerimientos y las limitaciones debido principalmente a las características **RF** que tiene cada uno de los algoritmos de posicionamiento y localización. La información sobre requerimientos y limitaciones **RF** es útil para verificar la factibilidad de los dispositivos FiPy y LoPy disponibles.

Si bien la hipótesis inicial pretendía analizar y comparar algoritmos de posicionamiento como: **ToA**, **TDoA**, **AoA** y **RSSI**, durante el desarrollo del presente trabajo de titulación, se demostró que los dispositivos de bajo costo FiPy y LoPy no tienen las características técnicas de medición de tiempo en el orden de los nanosegundos para aplicar el algoritmo de posicionamiento **ToA** o **TDoA** y no disponen de antenas inteligentes para aplicar el algoritmo de posicionamiento **AoA**. Con estas premisas y en base a las pruebas de factibilidad de los dispositivos presentadas en el Capítulo 4, únicamente resulta factible probar un sistema de posicionamiento basado en el algoritmo de posicionamiento **RSSI**. Además, de acuerdo a la Sección 4.2.5.2 se limita al

PS a escenarios con distancias inferiores a 100 m entre nodos ancla establecidos como tendencia aceptable, como consecuencia de la caracterización de los enlaces entre los nodos ancla y el nodo objetivo. Es decir, el **PS** con dispositivos FiPy y LoPy debe ser implementado en escenarios que no superen los 100 m; y debe basarse en mediciones de la variable **RSSI**.

La arquitectura general del **PS** es una arquitectura centralizada en el nodo objetivo. El nodo objetivo se encarga del análisis del valor **RSSI** del enlace de ida como el enlace de vuelta con los nodos ancla. Los valores **RSSI** del enlace de ida introducen error de incertidumbre en la medición debido a que cada dispositivo tiene diferente comportamiento respecto al sensor **RSSI**.

En la arquitectura centralizada, el nodo objetivo tiene dos enlaces de comunicación con cada nodo ancla, uno de ida y otro de vuelta. Debido a esto surgió la hipótesis de analizar el comportamiento del **PS** mediante el uso de los valores de la variable **RSSI** con tres enfoques: (1) únicamente enlace de ida; (2) únicamente enlace de vuelta; y (3) un promedio entre enlace de ida y de vuelta. En los resultados presentados en el Capítulo 5 se establece que es necesario evaluar los tres enfoques para seleccionar el adecuado para garantizar el correcto funcionamiento del **PS**.

Durante el diseño de la arquitectura, es necesario conocer los subsistemas del **PS** que ayudan a definir los protocolos involucrados en cada uno de los enlaces de comunicación entre los nodos ancla y el nodo objetivo. Con esta información, es posible desarrollar el algoritmo de posicionamiento y la configuración **RF** en cada dispositivo del **PS** (Apéndice D).

En la etapa de evaluación del Capítulo 5, se realizan diferentes campañas de medición con la finalidad de evaluar el comportamiento del **PS** e identificar factores de mal funcionamiento que introducen error en la estimación de la posición. Se aplican medidas correctivas para mitigar los malos comportamientos. Por ejemplo, el control del voltaje de alimentación que no debe ser inferior a 5 V, el cual, detecta y desecha los valores medidos de la variable **RSSI** con un valor menor a -115 dBm debido a que debajo de este umbral el valor de **RSSI** no es útil para el sistema.

Luego de un análisis de eficiencia de todas las campañas de medición presentado en el Capítulo 5, es evidente que el **PS** propuesto es adecuado para los escenarios de dimensión $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ y $150\text{ m} \times 150\text{ m}$, al presentar reducidos errores de estimación de la posición.

Por otra parte, los resultados entre el error promedio de estimación de la posición con mediciones en campo en comparación con los resultados de simulación son similares para cada uno de los escenarios de medición. Por tanto, es posible utilizar el procedimiento de simulación para crear escenarios y simular el comportamiento del **PS** para evitar costos y tiempo de implementación. Además, tener un algoritmo de simulación permite probar distintos escenarios para futuras implementaciones de localización que no requieran de alta precisión en sus resultados.

Es importante destacar que pese a la baja sensibilidad **RSSI** de los dispositivos con tecnología **LoRa** FiPy o LoPy el trabajo de titulación presenta resultados aceptables; debido a que es uno

de los primeros en expandir la dimensión de los escenarios a exterior y evaluar el [PS](#) basado en la variable [RSSI](#) con dispositivos de tecnología [LoRa](#) de bajo costo.

6.2. Recomendaciones

El presente trabajo de titulación al tratarse de la primera aplicación que utiliza la caracterización de enlaces entre los nodos ancla y el nodo objetivo presenta limitaciones, respecto a: dimensión de los escenarios y baja exactitud en la ubicación del objetivo con un error de estimación promedio de 8.55 m correspondiente al 6.72 % y de 10.80 m correspondiente al 5.09 % de los escenarios de 90 m×90 m y 150 m×150 m respectivamente. Esto se puede mejorar, si se trabaja con una mayor cantidad de nodos ancla o con otros algoritmos de posicionamiento como: [TDoA](#) o [ToA](#).

Al momento de realizar la caracterización de los enlaces entre los nodos ancla y el nodo objetivo para aplicaciones de localización debería realizar la caracterización en el escenario de prueba, con los nodos ancla en sus posiciones fijas, evitando las fuentes de error como árboles, edificios y ruido [RF](#).

Para trabajos similares de [PSs](#) basados en el algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) se recomienda: (1) Considerar los cambios climáticos con un sensor de temperatura y humedad, de esta manera se tiene más variables para identificar el ruido aleatorio que introduce el clima en las mediciones de la variable [RSSI](#); (2) Considerar dispositivos con mejor sensibilidad [RSSI](#), ya que, de esta variable depende la exactitud en la ubicación del objetivo; y (3) Analizar las características [RF](#) de los dispositivos disponibles para identificar la distancia máxima confiable para definir la dimensión de los escenarios de prueba.

6.3. Trabajos futuros

Para trabajos similares de sistemas de posicionamiento basados en el algoritmo de posicionamiento [RSSI](#) y localización por trilateración, resolver el sistema de ecuaciones de segundo grado con un método diferente al analítico, como: mínimos cuadrados o de series de *Taylor*.

Otro aspecto importante a considerar en trabajos similares, es buscar una forma alternativa de calcular el [PLM](#) de cada enlace entre los nodo ancla y el nodo objetivo. Buscar métodos estadísticos para el cálculo de modelo de pérdida por trayectoria que ayuden a compensar el error de incertidumbre de medición introducido.

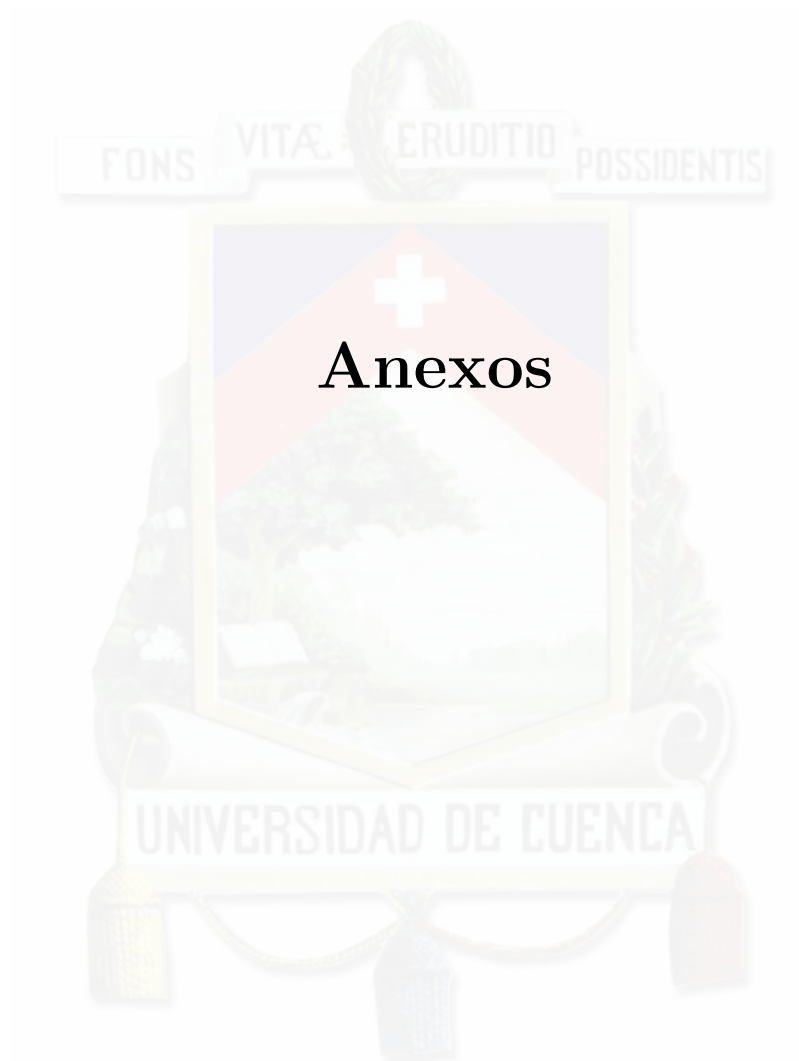
El [PS](#) de este trabajo de titulación se basa en el uso de valores de la variable [RSSI](#) y sirvió para demostrar que es posible implementar [PSs](#), pero para obtener errores menores en la estimación de la posición, es mejor ocupar un algoritmo de posicionamiento basado en mediciones de



tiempo como [ToA](#) o [TDoA](#). Para ello, se necesita de dispositivos con características de reloj con precisión en el orden de los nanosegundos.

Los trabajos similares de [PS](#) basados en algoritmos de posicionamiento diferente a [RSSI](#), abren la oportunidad a otros enfoques de arquitectura en la que cada nodo ancla es un servidor y todos están sincronizados con precisión en el orden de nanosegundos. El nodo objetivo es quien inicia la comunicación solo en un enlace de ida y el servidor de cada nodo ancla es quien adquiere el valor del tiempo de vuelo entre cada enlace para utilizarlo en cualquiera de los dos algoritmos de localización multilateración o trilateración.





Apéndice A

Algoritmos de localización

En este apéndice se demuestra analíticamente los sistemas de ecuaciones resultantes del algoritmo de localización trilateración para 3, 4, ..., n nodos ancla.

A.1. Algoritmo de localización trilateración

La Ecuación fundamental [A.1](#) se deriva del algoritmo de localización trilateración útil para [PSs](#) basados en algoritmos de posicionamiento [RSSI](#) y [ToA](#) de la Sección [2.3.1.1](#), para un enfoque en 2 dimensiones con 3, 4, ..., n nodos ancla.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = m_i^2, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.1})$$

Donde:

(x_i, y_i, z_i) , son las coordenadas conocidas de los nodos ancla,

m_i , son los estimaciones de rango entre los nodos ancla y el nodo objetivo,

n , es el número de nodos ancla,

(x, y, z) , son las coordenadas del nodo objetivo.

A.1.0.1. Demostración para 3 nodos ancla

Considerando un escenario en 2 dimensiones con 3 nodos ancla, se tiene la Ecuación [A.2](#) que es un sistema de ecuaciones de segundo grado.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = m_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = m_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = m_3^2 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Se tiene los cambios de variable de la Ecuación A.3.

$$\begin{cases} x = x' + x_1 \\ y = y' + y_1 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Reemplazando la Ecuación A.3 en la Ecuación A.2, se tiene la Ecuación A.4.

$$\begin{cases} x'^2 + y'^2 = m_1^2 \\ (x' + x_1 - x_2)^2 + (y' + y_1 - y_2)^2 = m_2^2 \\ (x' + x_1 - x_3)^2 + (y' + y_1 - y_3)^2 = m_3^2 \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Se tiene los cambios de variable de la Ecuación A.5.

$$\begin{cases} x'_2 = x_2 - x_1, & y'_2 = y_2 - y_1 \\ x'_3 = x_3 - x_1, & y'_3 = y_3 - y_1 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Reemplazando la Ecuación A.5 en la Ecuación A.4, se tiene la Ecuación A.6 que es el sistema de ecuaciones resultante lineal; listo para implementarse en el PS.

$$\begin{cases} x'_2 x'_2 + y'_2 y'_2 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_2^2 + x_2'^2 + y_2'^2) \\ x'_3 x'_3 + y'_3 y'_3 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_3^2 + x_3'^2 + y_3'^2) \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Finalmente, para el cálculo considerar los cambios de variables de las Ecuaciones A.3 y A.5. Notar que el par de coordenadas buscado es el de la Ecuación A.3

A.1.0.2. Demostración para 4 nodos ancla

Considerando un escenario en 2 dimensiones con 4 nodos ancla, y siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la Ecuación A.7 que es el sistema de ecuaciones resultante lineal; listo para implementarse en en PS.

$$\begin{cases} x'_2 x'_2 + y'_2 y'_2 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_2^2 + x_2'^2 + y_2'^2) \\ x'_3 x'_3 + y'_3 y'_3 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_3^2 + x_3'^2 + y_3'^2) \\ x'_4 x'_4 + y'_4 y'_4 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_4^2 + x_4'^2 + y_4'^2) \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Con los cambios de variable de la Ecuación A.8.

$$\begin{cases} x'_2 = x_2 - x_1, & y'_2 = y_2 - y_1 \\ x'_3 = x_3 - x_1, & y'_3 = y_3 - y_1 \\ x'_4 = x_4 - x_1, & y'_4 = y_4 - y_1 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Y el par de coordenadas buscado como la Ecuación A.9

$$\begin{cases} x = x' + x_1 \\ y = y' + y_1 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

A.1.0.3. Demostración para n nodos ancla

Considerando un escenario en 2 dimensiones con n nodos ancla, y siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la Ecuación A.10 que es el sistema de ecuaciones resultante lineal; listo para implementarse en en PS.

$$\begin{cases} x'x'_2 + y'y'_2 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_2^2 + x_2'^2 + y_2'^2) \\ x'x'_3 + y'y'_3 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_3^2 + x_3'^2 + y_3'^2) \\ x'x'_4 + y'y'_4 = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_4^2 + x_4'^2 + y_4'^2) \\ \dots \\ x'x'_n + y'y'_n = \frac{1}{2}(m_1^2 - m_n^2 + x_n'^2 + y_n'^2) \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Con los cambios de variable de la Ecuación A.11.

$$\begin{cases} x'_2 = x_2 - x_1, & y'_2 = y_2 - y_1 \\ x'_3 = x_3 - x_1, & y'_3 = y_3 - y_1 \\ x'_4 = x_4 - x_1, & y'_4 = y_4 - y_1 \\ \dots \\ x'_n = x_n - x_1, & y'_n = y_n - y_1 \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

Y el par de coordenadas buscado como la Ecuación A.12

$$\begin{cases} x = x' + x_1 \\ y = y' + y_1 \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

A.2. Evaluación del algoritmo trilateración

Con el objetivo de confirmar la hipótesis de que, mientras se aumenta el número de nodos ancla que interactúan en el algoritmo de localización, el error de estimación entre el punto estimado y el punto real se reduce. En este contexto, se crea un escenario de simulación con 6 nodos ancla distribuidos en un entorno no simétrico como indica la Tabla A.1.

Ancla	A	B	C	D	E	F	O
x (m)	0	50	35	50	0	-45	0
y (m)	40	0	-35	50	-80	45	0

Tabla A.1: Distribución escenario no simétrico de simulación.

La simulación consiste en introducir error en metros a saltos de 10m, menor o mayor a la distancia esperada entre el nodo ancla B y el nodo objetivo O en la posición real (0, 0). En este contexto, la Figura A.1 confirma la hipótesis, es decir, al aumentar el número de nodos ancla el error de estimación se reduce.

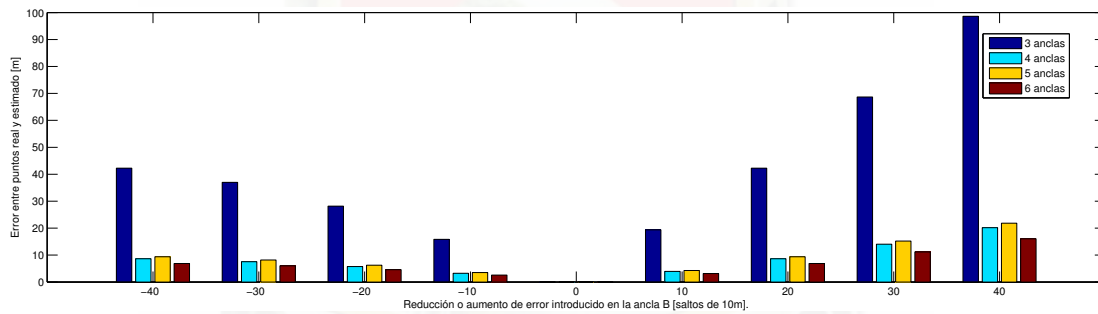


Figura A.1: Evaluación del error de estimación introducido en el algoritmo trilateración por el PLM.

A.3. Código del algoritmo trilateración

De acuerdo a la Sección A.1, el Listado A.1 muestra el código en *Matlab* necesario para evaluar el algoritmo de localización trilateración para 3 nodos ancla. Por otra parte, para algoritmos con numero de nodos ancla mayor a 3, seguir el mismo procedimiento.

```

1 x2p = x2 - x1;
2 y2p = y2 - y1;
3 x3p = x3 - x1;
4 y3p = y3 - y1;
5 A = [x2p y2p; ...
6      x3p y3p];
7 b = 0.5.*[bsa2m^2 - bsb2m^2 + x2p^2 + y2p^2; ...

```



```
8      bsa2m^2 - bsc2m^2 + x3p^2 + y3p^2];  
9  xp = A\b;  
10 xaprox = xp(1) + x1;  
11 yaprox = xp(2) + y1;
```

Listado A.1: trilateracion3anclas.m



Apéndice B

Bandas ISM en Ecuador

En este apéndice se detalla el uso de las bandas de frecuencia [ISM](#) en Ecuador.

B.1. Atribución de frecuencias en Ecuador

Ecuador pertenece a la región 2 que corresponde al continente de América, según la atribución de bandas realizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ([International Telecommunication Union \(ITU\)](#)). Además, el ente regulador encargado del control y distribución de las bandas de frecuencias en Ecuador es la [Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones \(ARCOTEL\)](#). En este contexto, la Tabla [B.1](#) muestra la distribución de las bandas [ISM](#) [\[16\]](#).

Banda ISM (MHz)	Región 2	Ecuador
430 – 432	Radiolocalización y aficionados.	Fijo, radiolocalización y aficionados.
432 – 438	Radiolocalización, aficionados y exploración de la tierra por satélite.	Fijo, radiolocalización, aficionados y exploración de la tierra por satélite.
438 – 440	Radiolocalización y aficionados.	Fijo, radiolocalización y aficionados.
806 – 890	Fijo, móvil y radiodifusión.	Fijo y móvil.
902 – 928	Fijo, aficionados, móvil salvo móvil aeronáutico y radiolocalización.	Fijo, aficionados, móvil salvo móvil aeronáutico y radiolocalización.
928 – 942	Fijo, móvil salvo móvil aeronáutico y radiolocalización.	Fijo y móvil salvo móvil aeronáutico.

Tabla B.1: Distribución de frecuencias para la región 2 y en Ecuador [\[16\]](#).

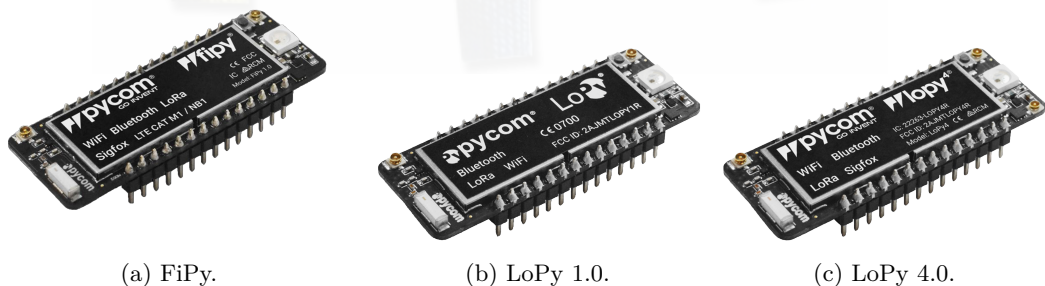
Apéndice C

Características hardware del sistema de posicionamiento

En este apéndice se detallan las características técnicas de cada equipo utilizado en el [PS](#), específicamente los dispositivos FiPy y LoPy en sus versiones 1.0 y 4.0. En este contexto, se resalta las características relevantes para el diseño e implementación del [PS](#).

C.1. FiPy y LoPy 1.0

La tarjetas de desarrollo FiPy y LoPy 1.0 de *Pycom* [\[56\]](#) tienen tecnología [LoRa](#), WiFi y [Bluetooth Low Energy \(BLE\)](#) (véase Figura [C.1a](#)). Además, tienen incorporado un microcontrolador habilitado para lenguaje *MycroPython*; utilizado en aplicaciones de [Internet of Things \(IoT\)](#). También, tienen incorporado el chip *Espressif* [\[58\]](#) de doble núcleo que ofrece flexibilidad en la potencia. Finalmente, opera en las bandas [ISM](#) 868 MHz y 915 MHz gracias al chip *SX1272* [LoRa](#) de *Semtech* [\[11, 37\]](#).



(a) FiPy.

(b) LoPy 1.0.

(c) LoPy 4.0.

Figura C.1: FiPy y LoPy en sus versiones 1.0 y 4.0 [\[10–12\]](#).

La tarjeta FiPy tiene una diferencia importante al agregar disponibilidad de una red 4G (véase Figura C.1a). En este contexto, la Figura C.2 muestra los protocolos de comunicación involucrados en la tarjeta FiPy, para establecer la comunicación entre el chip *Espressif* [58], el chip *SX1272* LoRa y la interfaz RF.

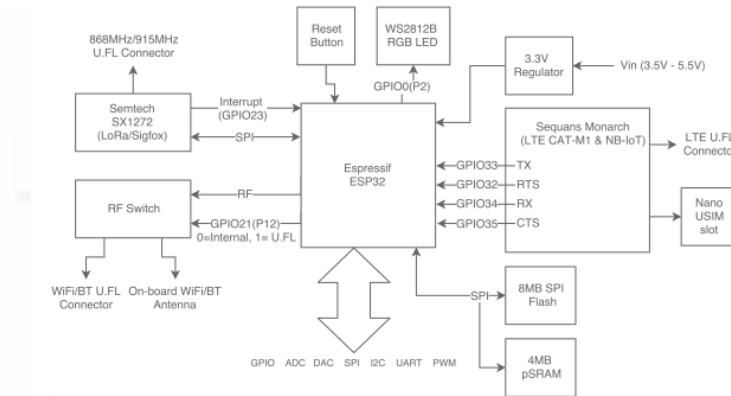


Figura C.2: Diagrama de bloques FiPy [10].

En cambio, la Figura C.3 muestra los protocolos de comunicación involucrados en la tarjeta LoPy versión 1.0.

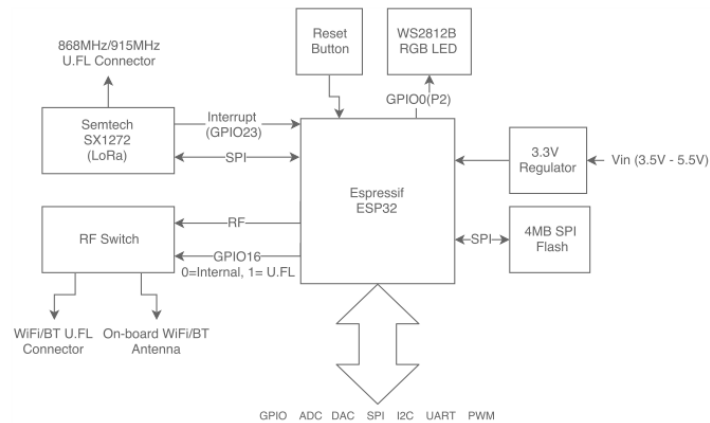


Figura C.3: Diagrama de bloques LoPy 1.0 [11].

Finalmente, en la Tabla C.1 se detallan las características principales de las tarjetas de desarrollo FiPy y LoPy versión 1.0.

Características	FiPy	LoPy 1.0	LoPy 4.0
Redes	LoRa, WiFi, BLE, Sigfox [28] y 4G	LoRa, WiFi y BLE	LoRa, WiFi, BLE y Sigfox [28]
RAM	520 KB + 4 MB	512 KB	520 KB + 4 MB
Flash externo	8 MB	4 MB	8 MB
RTC (kHz)	150	150	150
Bandas ISM (MHz)	868, y 915	868, y 915	433, 915, y 868
T_x LoRa (mA)	156	92.6	108
Punto de acceso WiFi (mA)	126	96.5	104
Cliente WiFi (mA)	137	107.3	99
Bluetooth (mA)	121	94	97.5
Chip Semtech [37]	SX1272	SX1272	SX1276
Rango (MHz)	860 – 1020	860 – 1020	137 – 1020
SF	6 – 12	6 – 12	6 – 12
BW (kHz)	125 – 500	125 – 500	7.8 – 500
Tasa de bits (kbps)	0.24 – 37.5	0.24 – 37.5	0.018 – 37.5
Sensibilidad RSSI (dBm)	–117 a –137	–117 a –137	–111 a –148

Tabla C.1: Características principales de las tarjetas de desarrollo FiPy LoPy [8–12].

C.1.1. Chip Semtech SX1272

El transceptor SX1272 tiene características LoRa, ya que, proporciona una comunicación con SS de rango amplio. Usando la patentada modulación LoRa puede llegar a una sensibilidad sobre los –137 dBm usando cristales de bajo costo [8]. Finalmente, la Tabla C.1 detalla las características principales del chip SX1272.

C.2. LoPy 4.0

Similar a la tarjeta LoPy versión 1.0, se considera la versión mejorada y a diferencia de la versión 1.0 incorpora tecnología LoRa, WiFi, BLE y Sigfox [28] (véase Figura C.1c). Opera en las bandas ISM 433, 868 y 915 MHz gracias al chip SX1276 LoRa & Sigfox [28] de Semtech [12, 37]. En este contexto, la Figura C.4 muestra los protocolos de comunicación involucrados en la tarjeta LoPy versión 4.0, para establecer la comunicación entre el chip Espressif [58], el chip SX1276 LoRa & Sigfox [28] y la interfaz RF. Finalmente, en la Tabla C.1 se detallan las características principales de la tarjeta de desarrollo LoPy versión 4.0.

C.2.1. Chip Semtech SX1276

Similar al transceptor SX1272, se considera la versión mejorada y puede llegar a una sensibilidad sobre los –148 dBm usando cristales de bajo costo [9]. Finalmente, en la Tabla C.1 se detallan

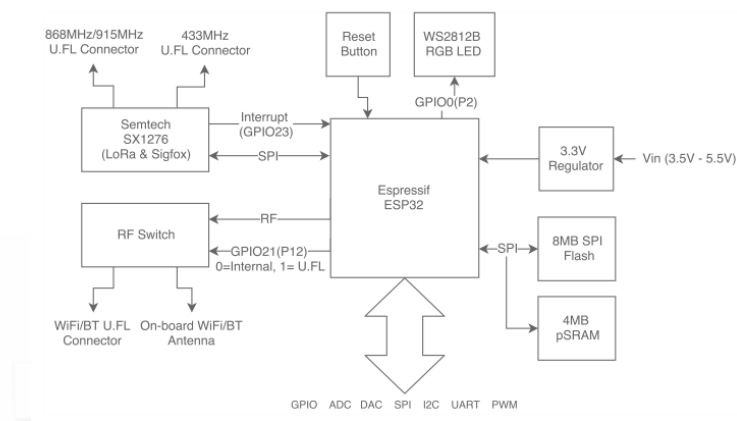


Figura C.4: Diagrama de bloques LoPy 4.0 [12].

las características principales del chip *SX1276* y en la Tabla C.2 se compara las características técnicas de los chips *LoRa*, bajo diferentes configuraciones de *SF* y *BW*.

BW (kHz)	SF	Sensibilidad SX1272 (dBm)	Sensibilidad SX1276 (dBm)
125	6	-121	-118
	7	-124	-123
	8	-127	-126
	9	-130	-129
	10	-133	-132
	11	-135	-133
	12	-137	-136
250	6	-118	-115
	7	-122	-120
	8	-125	-123
	9	-128	-125
	10	-130	-128
	11	-132	-130
	12	-135	-133
500	6	-111	-111
	7	-116	-116
	8	-119	-119
	9	-122	-122
	10	-125	-125
	11	-128	-128
	12	-129	-130

Tabla C.2: Características técnicas de chips SX1272 y SX1276 [8–12].

Apéndice D

Configuración de los dispositivos del sistema de posicionamiento

En este apéndice se detalla el desarrollo de los [PCBs](#) de control para los nodos ancla y objetivo del sistema de posicionamiento de bajo costo, ya sean, dispositivos FiPy o LoPy.

D.1. Diseño del módulo de control

En primer lugar, se eligen los componentes electrónicos necesarios para elaborar los [PCBs](#) de control para cada uno de los nodos ancla u objetivo. Además, cada componente se selecciona debido a consideraciones de funcionamiento utilizadas para elaborar el [PCB](#) de control final.

D.1.1. Consideraciones de diseño

Para el diseño de los [PCBs](#) de control hay que realizar una selección de componentes, considerando características como: tamaño, costo, capacidad eléctrica, resistencia a cambios de temperatura y humedad. Las características buscan que el módulo de control tenga un buen funcionamiento en entornos abiertos o expuestos a cambio de temperatura. En este contexto, la Tabla [D.1](#) muestra los componentes electrónicos elegidos y una breve descripción de su uso, para cada uno de los nodos ancla (NAs) y el nodo objetivo (NO).

Componente	Descripción	NO (u)	NA (u)
FiPy, LoPy 1.0 o 4.0	Dispositivos con tecnología LoRa	1	1
<i>LM7805</i>	Regulador de tensión a 5 V	1	1
Condensadores electrolíticos	Para filtrado de altas frecuencias en circuito regulador de tensión, 1 μ F	2	2
Fusible	Para protección contra cambios bruscos de corriente, 1 A	1	1
Resistencias	Para conectar adecuadamente entradas digitales, 1 k Ω	6	6
<i>Dip-switch</i>	Para controlar entradas digitales, 4 bits on/off	1	1
Pulsante	Montaje superficial	1	2
Pulsante	Montaje externo	1	0
Bornera	Montaje superficial	2	3

Tabla D.1: Materiales para el diseño de los PCBs.

D.1.1.1. Nodo objetivo

El nodo objetivo es el dispositivo que busca su propia ubicación con respecto a puntos estáticos, es decir, realiza acciones importantes para el auto [PS](#) (véase Sección 2.2). Por ejemplo: captura y almacena valores de la variable [RSSI](#), habilita un servidor [FTP](#) para extracción de datos. En consecuencia, la Tabla D.2 muestra las consideraciones de diseño del [PCB](#) de control del nodo objetivo.

Parámetro	Descripción
Configuración LoRa	Configuración de la capa física LoRa y del servidor FTP .
Regulador de tensión	Regula tensión de entrada del módulo en 5 V para la alimentación del dispositivo FiPy o LoPy.
<i>Bootloader</i>	Restablecer dispositivos FiPy o LoPy a configuración de fábrica.
Entradas Digitales	Banderas para iniciar la adquisición de datos, activar o desactivar el servidor FTP .

Tabla D.2: Consideraciones de diseño del PCB de control del nodo objetivo.

D.1.1.2. Nodo ancla

Los nodos ancla establecen comunicación con el nodo objetivo y actúan únicamente como repetidores de la señal [RF](#), retransmitiendo los datos al nodo objetivo. Este procedimiento ocupa la configuración básica de modulación [LoRa](#). En este contexto, la Tabla D.3 muestra las consideraciones de diseño del [PCB](#) de control del nodo ancla.

D.1.2. Diseño esquemático

El diseño esquemático es importante para configurar cada uno de los [PCBs](#) de control con las consideraciones de las Tablas D.2 y D.3 para el nodo objetivo y nodo ancla respectivamente. En

Parámetro	Descripción
Configuración LoRa	Configuración de la capa física LoRa .
Regulador de tensión	Regula tensión de entrada del módulo en 5V para la alimentación del dispositivo FiPy o LoPy.
<i>Bootloader</i>	Restablecer dispositivos FiPy o LoPy a configuración de fábrica.

Tabla D.3: Consideraciones de diseño del PCB de control del nodo ancla.

este contexto, la Figura D.1 permite visualizar las interconexiones de los elementos electrónicos con los dispositivos FiPy o LoPy,

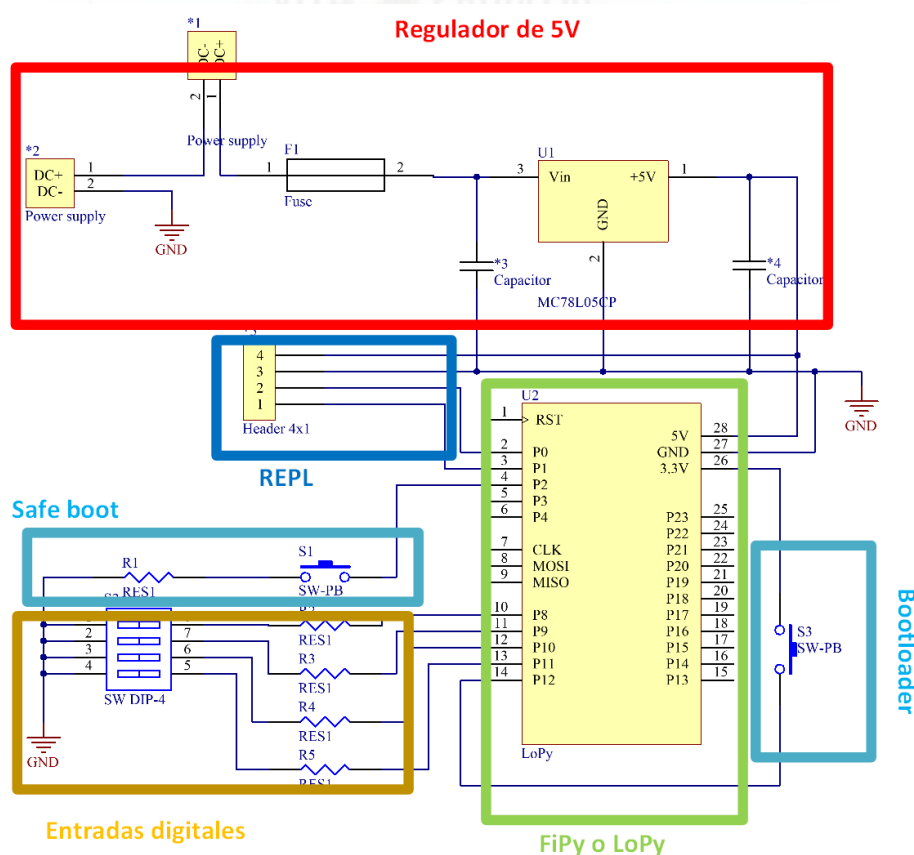
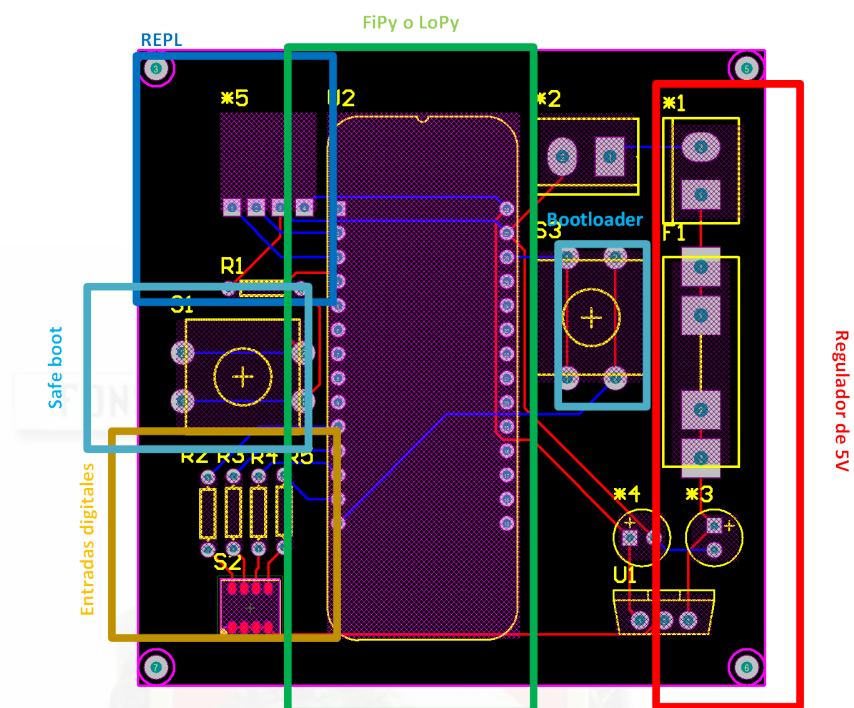


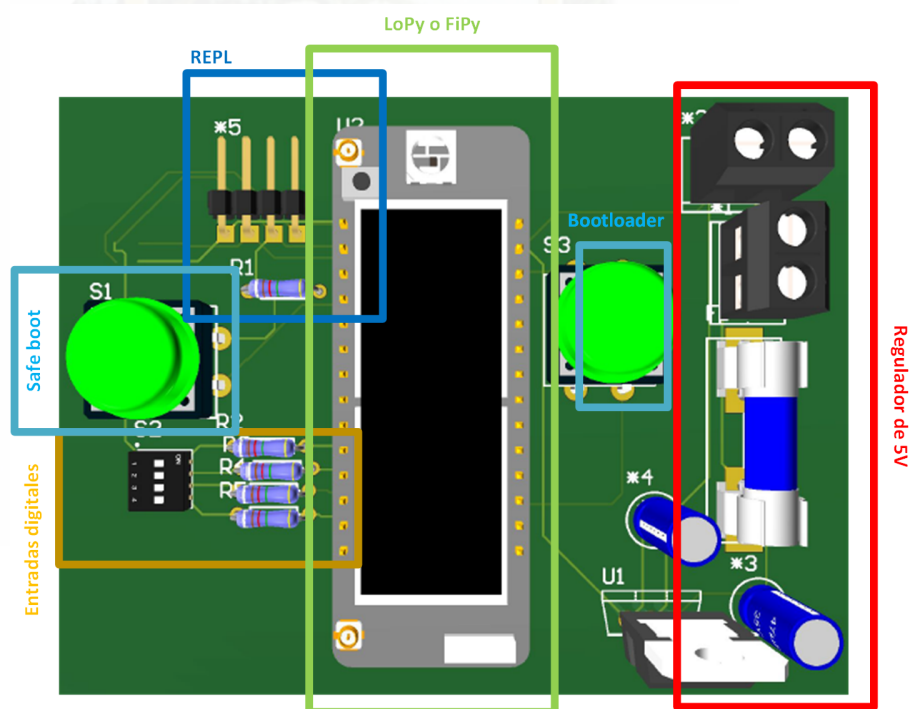
Figura D.1: Diseño esquemático del PCB de control del nodo ancla.

D.1.3. Diseño PCB

De acuerdo a las consideraciones de las Tablas D.2 y D.3 se necesitan dispositivos pequeños y autónomos para el correcto funcionamiento del PS. En este contexto, las Figuras D.2a y D.2b muestran el diseño del PCB de control final y la visualización 3D del nodo ancla.



(a) Diseño del PCB de control.



(b) Visualización 3D del PCB de control.

Figura D.2: PCB de control final del nodo ancla.

D.2. Funcionamiento del PCB de control

El **PCB** de control tiene dos principales modos de funcionamiento: (1) Modo nodo objetivo, y (2) Modo nodo ancla (véase Figura D.3). Los 2 modos de operación tienen configuraciones similares con respecto a la creación de un servidor **FTP** y configuración de la modulación **LoRa** de $BW = 500 \text{ kHz}$, $SF = 12$, $P_{TX} = 5 \text{ dBm}$, $CR = 4/5$ y un preámbulo = 8. Además, en la configuración del servidor **FTP** la palabra **LoPy** es el usuario y la contraseña.

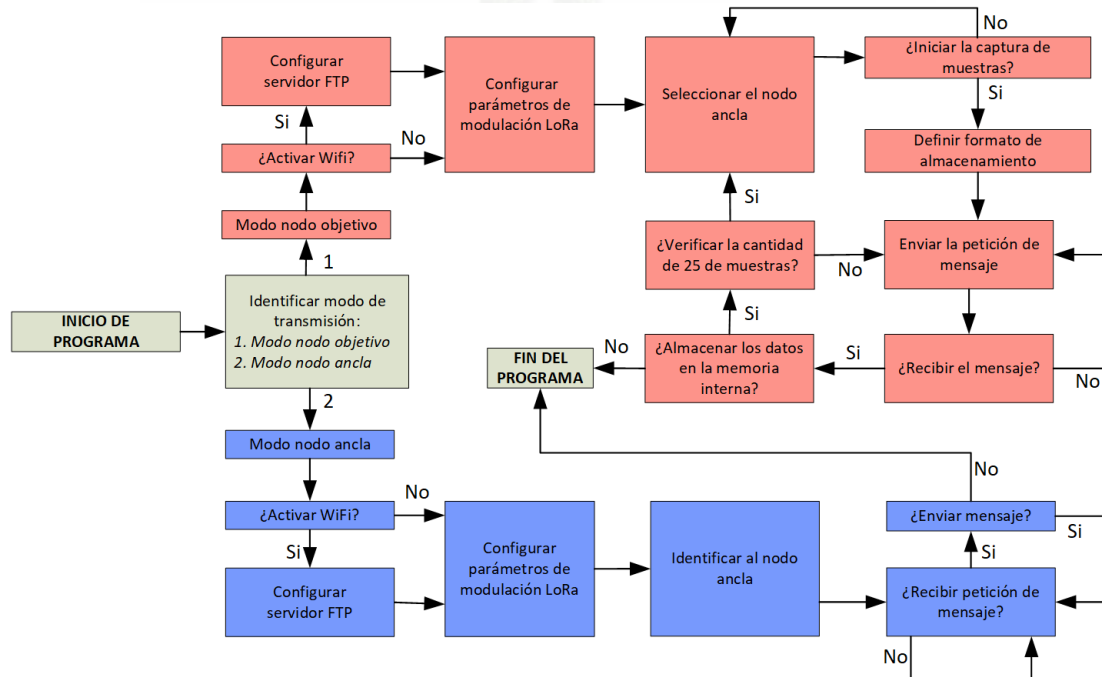


Figura D.3: Diagrama de funcionamiento del nodo ancla y del nodo objetivo.

D.2.1. Modo nodo objetivo

En este modo el nodo objetivo adquiere y almacena los valores medidos de la variable **RSSI** resultado de los enlaces de ida y de vuelta. Por lo tanto, tiene las siguientes etapas: (1) Activar o desactivar el servidor **FTP**; (2) Cargar parámetros de configuración de la modulación **LoRa**; (3) Seleccionar el nodo ancla con el que se va a comunicar; (4) Detectar la activación de la entrada digital externa para iniciar la adquisición de datos, (5) Definir el formato de almacenamiento de datos, como: nombre del nodo ancla, carpeta almacenamiento y numero de muestras; (6) Enviar petición de mensaje, enlace de ida; (7) Esperar el mensaje, enlace de vuelta; (8) Una vez recibido el mensaje, capturar los valores de las variables **RSSI** y **SNR** de los enlaces de ida y de vuelta; y almacenar en un archivo de texto *.txt* en la memoria interna; y (9) Verificar

la culminación del proceso de medición, de ser el caso, vuelve a seleccionar el nodo al cual se quiere comunicar y retorna a la etapa (3).

Por otra parte, al encender los dispositivos FiPy o LoPy, dos archivos se ejecutan automáticamente. En primer lugar, *boot.py* y luego *main.py* ubicados en la dirección */flash* de la memoria interna. En cambio, el *script main.py* depende de los *scripts configurations.py* y *functions.py* para su correcto funcionamiento. En este contexto, el funcionamiento de la Figura D.3 se refleja en los códigos de los Listados D.1, D.2, D.3 y D.4.

```
1 from machine import UART
2 import machine
3 import os
4 uart = UART(0, baudrate=115200)
5 os.dupterm(uart)
6 machine.main('main.py')
```

Listado D.1: boot.py

```
1 # importacion de librerias basicas
2 from network import LoRa
3 from machine import Timer
4 from network import Server
5 from machine import Pin
6 from network import WLAN
7 import socket
8 import machine
9 import pycom
10 import time
11 import os
12 import network
13 #---Configuracion LoRa---
14 lora = LoRa(mode=LoRa.LORA)
15 lora.init(mode=LoRa.LORA, region=LoRa.US915, frequency=915000000,
16          tx_power=5, bandwidth=LoRa.BW_500KHZ, sf=12, preamble=8,
17          coding_rate=LoRa.CODING_4_5, power_mode=LoRa.ALWAYS_ON,
18          tx_retries=1, tx_iq=False, rx_iq=False, adr=False,
19          public=False, device_class=LoRa.CLASS_A)
20 s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
21 s.setblocking(False)
22 #---Definir entradas digitales---
23 p7 = Pin('P7', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
24 p8 = Pin('P8', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
25 p9 = Pin('P9', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
26 p10 = Pin('P10', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
27 p11 = Pin('P11', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
28 #---Configuracion WiFi---
29 wlan = WLAN()
30 if p10() == 1:
31     wlan.deinit()
32     print('WiFi desenable')
```



```
33     print('FTP offline')
34 elif p10()==0:
35     print('WiFi enable')
36     print('FTP online')
37     server = Server(login=('lopy', 'lopy'), timeout=60)
38     server.timeout(300) # change the timeout
39     server.timeout() # get the timeout
40 pycom.heartbeat(False)
```

Listado D.2: configuration.py

```
1 from network import LoRa
2 from machine import Timer
3 from network import Server
4 from machine import Pin
5 from network import WLAN
6 from configuration import *
7 import socket
8 import machine
9 import pycom
10 import time
11 import os
12 import network
13
14 def createdir(dir):
15     try:
16         os.mkdir(dir)
17         print('El directorio:-',dir,'- se ha creado')
18     except Exception as e:
19         text = str(e)
20     return
21 def selector():
22     if p7()==1 and p8()==1 and p9()==1:
23         Motes=[['A',97]]
24     elif p7()==1 and p8()==1 and p9()==0:
25         Motes=[['B',98]]
26     elif p7()==1 and p8()==0 and p9()==1:
27         Motes=[['C',99]]
28     elif p7()==1 and p8()==0 and p9()==0:
29         Motes=[['D',100]]
30     elif p7()==0 and p8()==1 and p9()==1:
31         Motes=[['E',101]]
32     elif p7()==0 and p8()==1 and p9()==0:
33         Motes=[['F',102]]
34     else:
35         print('No hay carga')
36         Motes=[['A',97],['B',98],['C',99],['D',100]]
37     print(str(Motes)+'-Cargado-')
38     return Motes
39 def default():
```



```
40 n=len(os.listdir())-7
41 if n==1:
42     print('Creando Carpetas')
43     os.mkdir('A')
44     os.mkdir('B')
45     os.mkdir('C')
46     os.mkdir('D')
47     os.mkdir('E')
48     os.mkdir('F')
49     os.mkdir('/flash/A/Av1')
50     os.mkdir('/flash/B/Bv1')
51     os.mkdir('/flash/C/Cv1')
52     os.mkdir('/flash/D/Dv1')
53     os.mkdir('/flash/E/Ev1')
54     os.mkdir('/flash/F/Fv1')
55 else:
56     print('Ya existen las carpetas')
57 return
```

Listado D.3: funtions.py

```
1 from configuration import *
2 from funtions import *
3 def main():
4     a=0
5     default()
6     t = Timer.Chrono()
7     while(True):
8         pycom.rgbled(0xff0000) # red
9         time.sleep(3)
10        Motes=selector()
11        #print(str(Motes))
12        c=len(os.listdir('/flash/'+Motes[0][0]))
13        n=len(os.listdir('/flash/'+Motes[0][0]+'/' +Motes[0][0]+'v'+str(c)))+1
14        #print('c=%d,n=%d'%(c,(n-1)))
15        if n<21:
16            dir='/flash/'+Motes[0][0]+'/' +Motes[0][0]+'v'+str(c)
17        elif n>=21:
18            dir='/flash/'+Motes[0][0]+'/' +Motes[0][0]+'v'+str(c+1)
19            createdir(dir)
20        print('c=%d,n=%d| dir:%s'%(c,(n-1),dir))
21        a += 1
22        while p11()==0:
23            pycom.rgbled(0x00ff00) # green
24            time.sleep(1)
25            for mote in Motes:
26                time.sleep(1)
27                pycom.rgbled(0x00ff00) # green
28                print('—Experimento %s: test %d—'%(mote[0],n))
29                print('item\tRSSI1\tSNR1\tRSSI2\tSNR2')
```

```
30     archivo=dir+'/test'+str(n)+'.txt'
31     f=open(archivo, 'w')
32     f.close()
33     for i in range(0, 25): # Definimos el numero de muestras por
cada test
34         m=b''
35         t.start()
36         s.send(mote[0])
37         while len(m)==0:
38             if t.read()>3:
39                 break
40             m=s.recv(8)
41         if t.read()>2:
42             rssi='XX'
43             snr='XX'
44             line='%s\t%s'%(rssi, snr)
45         else:
46             receive=str(m)
47             rssi_r=receive[3:7]
48             snr_r=receive[7:9]
49             rssi=lora.stats()[1]
50             snr=lora.stats()[2]
51             line='%d\t%d\t%s\t%s'%(rssi, snr, rssi_r, snr_r)
52             f=open(archivo, 'a')
53             f.write(str(line+'\r\n'))
54             f.close()
55         t.stop()
56         print('%03d'%(i+1)+'\t'+line)
57         t.reset()
58     print('—Fin # %s: test %d—'%(Motes[0][0], n))
59     n += 1
60 if __name__ == "__main__":
61     main()
```

Listado D.4: main.py

D.2.2. Modo nodo ancla

El principal funcionamiento del nodo ancla es responder a la petición del nodo objetivo, destacando las siguientes etapas de funcionamiento: (1) Activar o desactivar el servidor [FTP](#); (2) Cargar parámetros de configuración de la modulación [LoRa](#); (3) Identificar el nodo ancla con una ID; (4) Detectar la petición de mensaje, y responder; (5) Enviar el mensaje y retornar a la etapa (4). En este contexto, el funcionamiento del nodo ancla se refleja en el código del Listado [D.5](#).

```
1 from network import LoRa
2 from machine import Timer
```



```
3 from network import Server
4 import socket
5 import pycom
6 from machine import Pin
7 from network import WLAN
8 import time
9 lora = LoRa(mode=LoRa.LORA)
10 lora.init(mode=LoRa.LORA, region=LoRa.US915, frequency=915000000,
11          tx_power=5, bandwidth=LoRa.BW_500KHZ, sf=12, preamble=8,
12          coding_rate=LoRa.CODING_4_5, power_mode=LoRa.ALWAYS_ON,
13          tx_retries=1, tx_iq=False, rx_iq=False, adr=False,
14          public=False, device_class=LoRa.CLASS_A)
15 s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
16 s.setblocking(False)
17 pycom.heartbeat(False)
18 p8 = Pin('P8', mode=Pin.IN, pull=Pin.PULL_UP)
19 time.sleep(1)
20 wlan = WLAN()
21 if p8() == 1:
22     wlan.deinit()
23     print('WiFi desactivado')
24     print('Servidor FTP fuera de linea')
25 elif p8() == 0:
26     #wlan.init(mode=WLAN.AP)
27     print('WiFi activado')
28     server = Server(login=('lopy', 'lopy'), timeout=60)
29     server.timeout(300) # change the timeout
30     server.timeout() # get the timeout
31     server.isrunning() # check whether the server is running or not
32 # pycom.rgbled(0x0000ff) # blue
33 mote=[b'D', 'd']
34 print('Mote-' + str(mote[0]) + '-Sensing...')
35 pycom.rgbled(0x0000ff) # blue
36 while True:
37     if s.recv(8) == mote[0]:
38         rssi=lora.stats()[1]
39         snr=lora.stats()[2]
40         id=mote[1]
41         line=' %04d %02d ' %(id, rssi, snr)
42         s.send(line)
43         print(line)
```

Listado D.5: main.py

Apéndice E

Evaluación variabilidad en la potencia de transmisión

En este apéndice se evalúa la potencia de transmisión de los dispositivos FiPy y LoPy versión 1.0, comparando la diferencia entre configuraciones de parámetros de la modulación LoRa versus mediciones de la potencia de salida de los dispositivos utilizando el equipo PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) del fabricante *National Instruments* [59] con sus módulos de radio frecuencia disponible en el laboratorio de electrónica la Universidad de Cuenca.

E.1. Variabilidad en la potencia de transmisión

La prueba consiste en configurar los parámetros de la modulación LoRa vía lenguaje de programación, luego a la salida del dispositivo FiPy o LoPy 1.0 se conecta un atenuador de 30 dB para garantizar una potencia dentro del rango permitido del equipo PXI para garantizar su correcto funcionamiento. En este contexto, se realizan cuatro evaluaciones una con mínima potencia de 5 dBm y otra con máxima potencia de 20 dBm para cada uno de los dispositivos.

La primera prueba se presenta en la Figura E.1, en donde, vía programación se establecen los parámetros de la modulación LoRa como: $P_{TX} = 5$ dBm y $BW = 500$ kHz en el equipo FiPy con identificador *f1e0*. Seguido se conecta el atenuador de 30 dB. Por lo tanto, se espera observar -25 dBm en el equipo PXI. Pero, se observa un valor de potencia recibida de -29.74 dBm, es decir, un error de -4.74 dBm. Además, se observa un valor de $BW = 608.97$ kHz, es decir, un error de 108.97 kHz.

Del mismo modo, la segunda prueba se presenta en la Figura E.2, en donde, vía programación se establecen los parámetros de la modulación LoRa como: $P_{TX} = 20$ dBm y $BW = 500$ kHz

en el equipo FiPy con identificador *ee00*. Seguido se conecta el atenuador de 30 dB. Por lo tanto, se espera observar -10 dBm en el equipo *PXI*. Pero, se observa un valor de potencia recibida de -23.75 dBm, es decir, un error de -13.75 dBm. Además, se observa un valor de *BW* = 608.97 kHz, es decir, un error de 108.97 kHz.

Es evidente una diferencia significativa de la potencia de transmisión entre la configuración vía programación versus las mediciones en el equipo *PXI* de los equipos FiPy. Es decir, el dispositivo presenta mayor error a una configuración con la máxima potencia de 20 dBm.

En cambio, la tercera prueba se presenta en la Figura E.3, en donde, vía programación se establecen los parámetros de la modulación *LoRa* como: $P_{TX} = 20$ dBm y *BW* = 500 kHz en el equipo LoPy con identificador *7fec*. Seguido se conecta el atenuador de 30 dB. Por lo tanto, se espera observar -10 dBm en el equipo *PXI*. Pero, se observa un valor de potencia recibida de -11.97 dBm, es decir, un error de -1.97 dBm. Además, se observa un valor de *BW* = 520.83 kHz, es decir, un error de 20.83 kHz.

Finalmente, la cuarta prueba se presenta en la Figura E.4, en donde, vía programación se establecen los parámetros de la modulación *LoRa* como: $P_{TX} = 5$ dBm y *BW* = 500 kHz en el equipo LoPy con identificador *6e30*. Seguido se conecta el atenuador de 30 dB. Por lo tanto, se espera observar -25 dBm en el equipo *PXI*. Pero, se observa un valor de potencia recibida de -25.94 dBm, es decir, un error de -0.94 dBm. Además, se observa un valor de *BW* = 528.84 kHz, es decir, un error de 28.84 kHz.

En conclusión, es evidente, que los dispositivos LoPy versión 1.0 tienen menor discrepancia entre la configuración vía programación versus las mediciones en el equipo *PXI*. De esta manera, para reducir la fuente de incertidumbre introducida por los equipos FiPy al funcionamiento del *PS*, se establece la configuración de la modulación *LoRa* ideal como: *BW* = 500 kHz, *SF* = 12 y $P_{TX} = 5$ dBm.

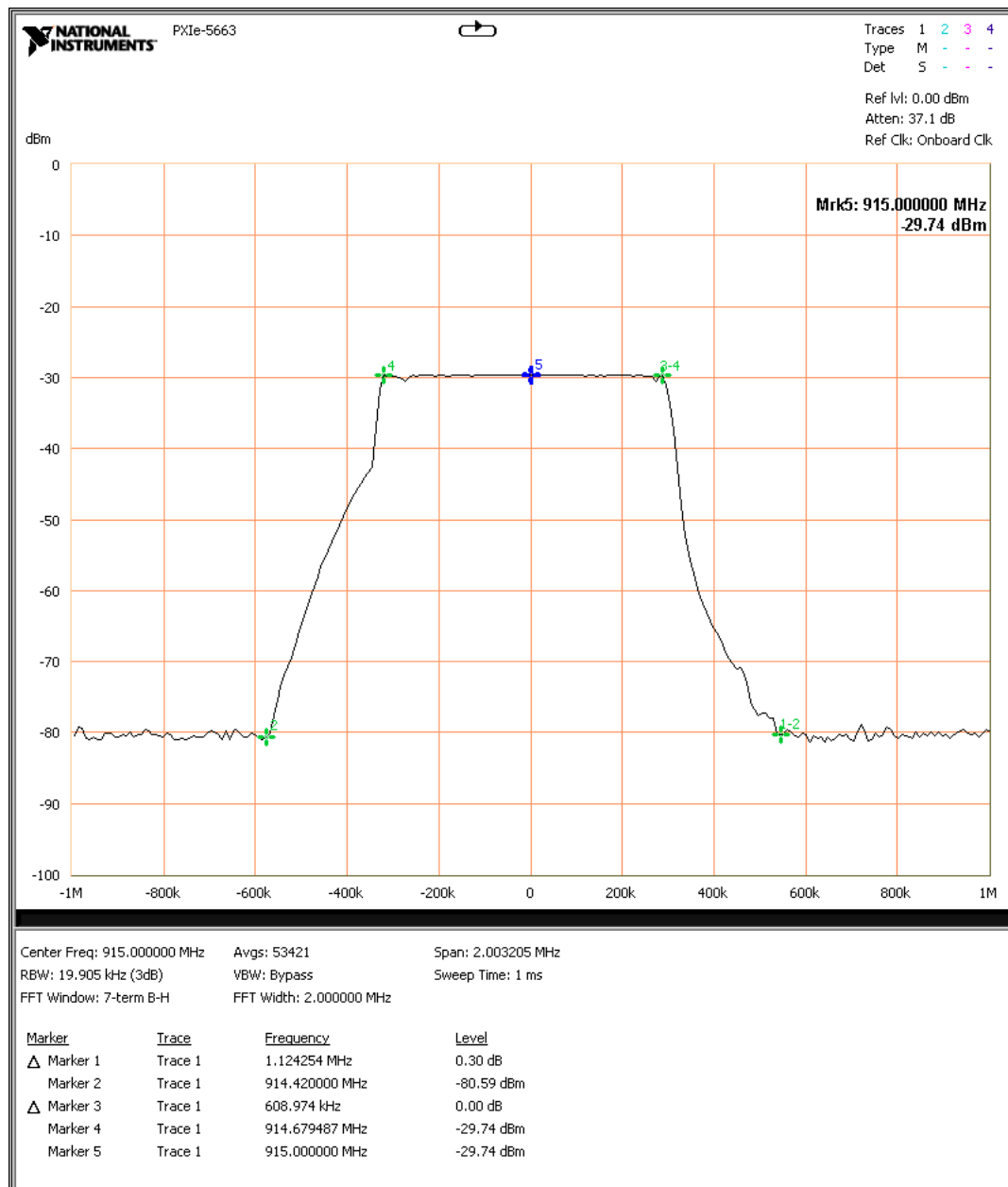


Figura E.1: Equipo FiPy con identificador $f1e0$ a $BW=500$ kHz, $SF=12$ y $P_{TX}=5$ dBm.

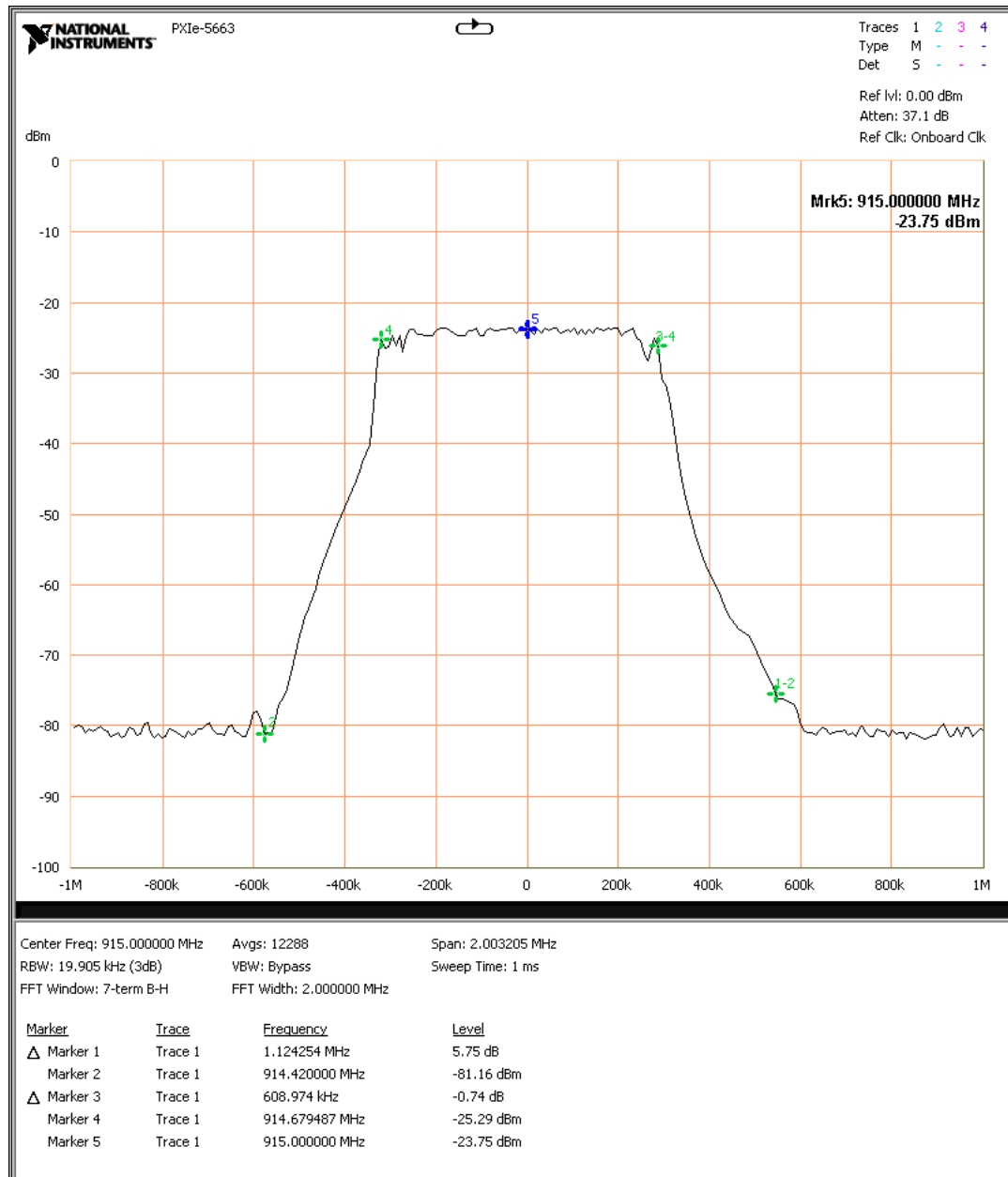


Figura E.2: Equipo FiPy con identificador *ee00* a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 20$ dBm.

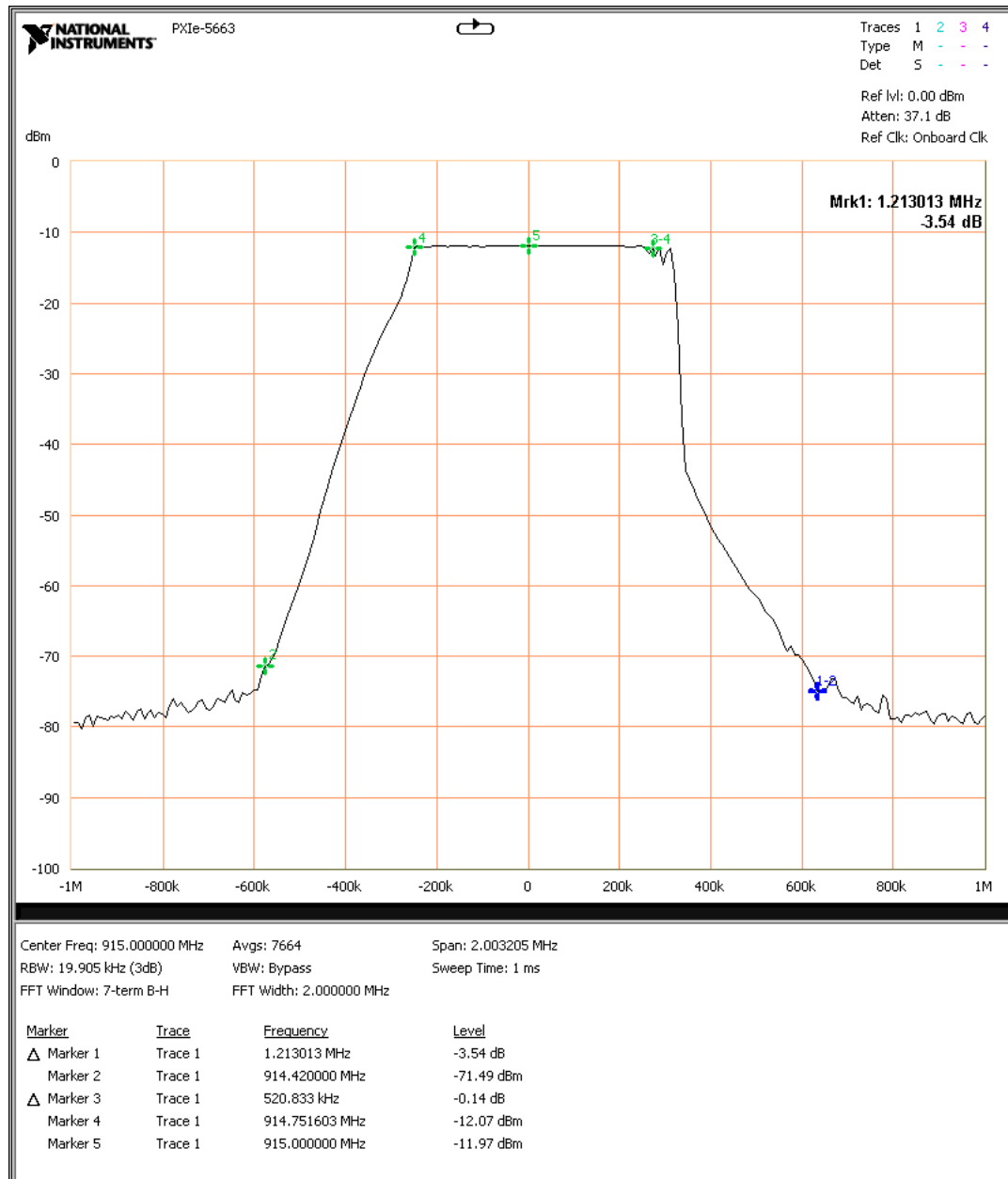


Figura E.3: Equipo LoPy 1.0 con identificador $7fec$ a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 20$ dBm.

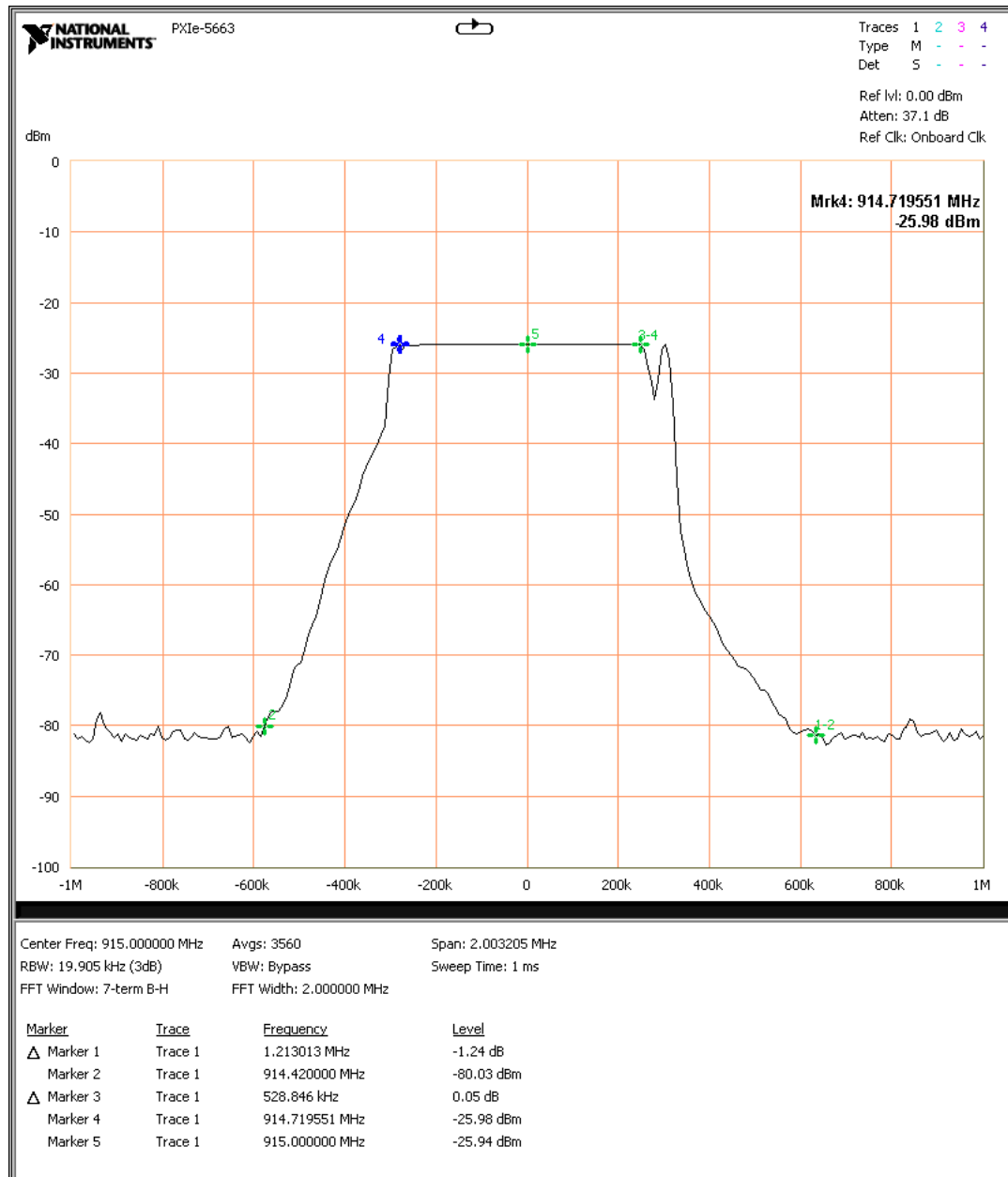


Figura E.4: Equipo LoPy 1.0 con identificador 6e30 a $BW = 500$ kHz, $SF = 12$ y $P_{TX} = 5$ dBm.

Apéndice F

Paquetes LoRa

En este apéndice se detalla la estructura de los paquetes LoRa. Además, se destaca la utilidad de calculadora teórica de transmisiones LoRa propiedad de *Semtech* [37].

F.1. Estructura de los paquetes LoRa

El chip LoRa emplea dos formatos de paquete: explícito e implícito. El paquete explícito incluye un encabezado corto que contiene información sobre el número de *bytes*, CR y si se utiliza verificación por redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check* (CRC)) [8, 9]. En este contexto, la estructura del paquete se muestra en la Figura F.1, en donde, el preámbulo se usa para sincronizar el receptor con el flujo de datos entrantes y el encabezado depende de cuál de los dos formatos de paquete se ha seleccionado.

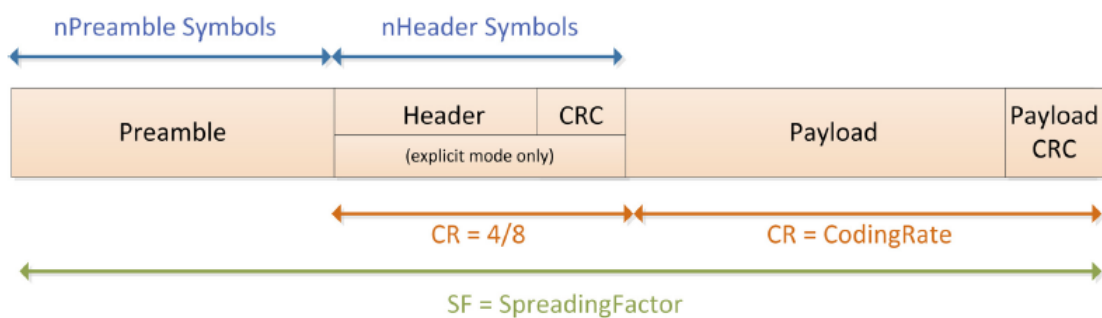


Figura F.1: Estructura del paquete LoRa [8, 9].

F.1.1. Modo de encabezado explícito

Este es el modo configurado por defecto en el chip **LoRa**, en donde, la cabecera proporciona información en la carga útil. Por ejemplo: longitud de la carga útil en *bytes*, **FEC** y opcional habilitar o no un **CRC** de 16 bits para la carga útil. Además, la cabecera se transmite con la máxima tasa de datos (4/8) y también tiene su propio **CRC** para permitir que el receptor descarte los encabezados no válidos. En este contexto, la Figura F.1 muestra el formato de paquete explícito configurado por *default* en los dispositivos FiPy y LoPy.

F.1.2. Modo de encabezado implícito

En escenarios donde la carga útil, **CR** y la presencia de **CRC** son fijas o conocidas, puede ser ventajoso reducir el tiempo de transmisión estableciendo el modo de encabezado implícito, eliminando el encabezado del paquete. En este caso, las configuraciones de la longitud de la carga útil, **FEC** y **CRC** se las realiza manualmente. En este contexto, la Figura F.1 muestra el formato de paquete implícito eliminando el encabezado del paquete.

F.1.3. Baja tasa de datos optimizada

Para mejorar la robustez de la transmisión a las variaciones en frecuencia a lo largo de la duración de la transmisión y recepción del paquete a configuraciones con **SFs** altos de 11, 12 y **BW** = 125 kHz; existe un bit para habilitar esta configuración.

F.2. Tiempo en aire

Para una determinada configuración de **SF**, **CR** y **BW** de la señal, el tiempo total de transmisión en el aire de un paquete **LoRa** se puede calcular de la siguiente manera, la duración del paquete **LoRa** es igual a suma de la duración del preámbulo y la carga útil expresado en la Ecuación F.1.

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (F.1)$$

Donde:

$T_{preamble}$, tiempo del preámbulo en segundos y depende del tiempo de símbolo Ecuación F.2,
 $T_{payload}$, tiempo de la carga útil en segundos y depende del modo de encabezado seleccionado Ecuación F.3.

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \times T_{sym} \quad (F.2)$$

Donde:

$n_{preamble}$, longitud programa del preámbulo,

T_{sym} , tiempo de símbolo en segundos y depende de la tasa de símbolos.

$$T_{payload} = T_{sym} \times (8 + \max(\text{ceil}(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)}))) \quad (F.3)$$

Donde:

PL , carga útil en *bytes*,

CRC , habilitado= 1, deshabilitado= 0,

H , encabezado, habilitado= 1, deshabilitado= 0,

DE , tasa de datos optimizada, habilitado= 1, deshabilitado= 0,

CR , 1, 2, 3 ó 4.

F.3. Herramienta para cálculos teóricos de chips LoRa de *Semtech*

La calculadora propiedad de *Semtech*[37] útil para realizar cálculos teóricos sobre: tiempos, rendimiento [RF](#) y consumo energético. Diseñada para dispositivos con chips [LoRa SX1272](#) incorporados en los dispositivos FiPy y LoPy versión 1.0; y con chips [LoRa SX1276](#) incorporados en los dispositivos LoPy versión 4.0.

F.3.1. Prueba con la configuración LoRa del PS

La configuración de parámetros de modulación [LoRa](#) para el [PS](#) se detalla en la Tabla [F.1](#) (véase Sección [4.3.3](#)).

Parámetro	SF	BW (kHz)	Preámbulo	CR	P_{TX} (dBm)
Valor	12	500	8	4/5	5

Tabla F.1: Parámetros de modulación LoRa.

La calculadora necesita parámetros de entrada, divididos en tres secciones: (1) Configuraciones del chip [LoRa](#), la Tabla [F.2](#) muestra todas las posibles configuraciones; (2) Configuración de paquetes, la Tabla [F.3](#) muestra todas las posibles configuraciones; y (3) Configuración [RF](#), la Tabla [F.4](#) muestra todas las posibles configuraciones.

Parámetro	Valores
SF	6 – 12
BW (kHz)	7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.25, 41.7, 62.5, 125, 250, 500
CR ($4/CR + 4$)	1 – 4
Tasa de datos optimizada	Activado/desactivado

Tabla F.2: Configuración del chip LoRa.

Parámetro	Valores
Carga útil (<i>bytes</i>)	1 – 255
Preámbulo (símbolos)	6 + 4 a 65535 + 4
Modo de encabezado	Explícito/implícito
CRC	Activado/desactivado

Tabla F.3: Configuración de paquetes.

Finalmente la Figura F.2 y la Tabla F.5 muestran el resultado de usar la configuración del PS en la calculadora.

Parámetro	Valores
Frecuencia (Hz)	915000000
P_{TX} (dBm)	5 – 20

Tabla F.4: Configuración RF.

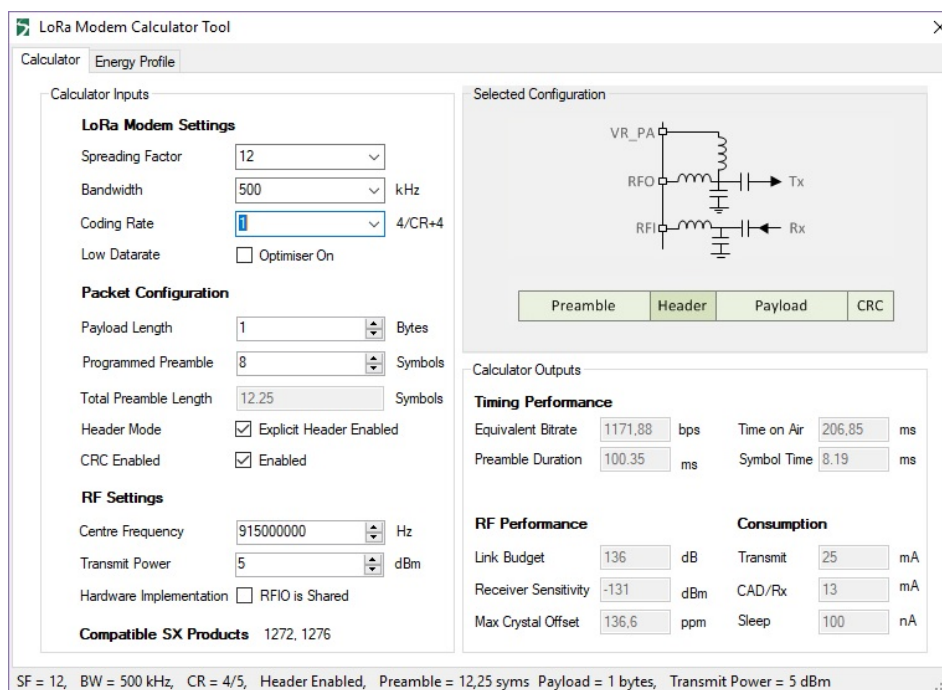


Figura F.2: Calculadora para chips LoRa.

Requerimiento	Descripción
Rendimiento de tiempo	Tasa de bits equivalente: 1171.88 bps
	Duración de preámbulo: 100.35 ms
	Tiempo en aire: 206.85 ms
	Tiempo de símbolo: 8.19 ms
Rendimiento RF	Presupuesto de enlace: 136 dB
	Sensibilidad de recepción: -131 dBm
	Compensación de cristal máxima: 136.6 ppm
Consumo energético	Transmitir: 25 mA
	CAD/Rx: 13 mA
	Modo hibernar: 100 nA

Tabla F.5: Resultados de rendimiento de tiempo, RF y consumo energético con parámetros de modulación LoRa de la Tabla F.1.

Bibliografía

- [1] A. Roxin, J. Gaber, M. Wack, y A. Nait-Sidi-Moh, “Survey of Wireless Geolocation Techniques,” in *2007 IEEE Globecom Workshops*. Washington, DC, USA: IEEE, Nov. 2007, pp. 1–9. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4437809/>
- [2] S. A. R. Zekavat y R. M. Buehrer, Eds., *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., Sep. 2011. [En línea]. Disponible: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118104750>
- [3] Y. Liu, Z. Yang, X. Wang, y L. Jian, “Location, Localization, and Localizability,” *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 25, num. 2, pp. 274–297, Mar. 2010. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s11390-010-9324-2>
- [4] Y. Liu y Z. Yang, *Location, localization, and localizability: location-awareness technology for wireless networks*. New York: Springer, 2011, oCLC: ocn648933193.
- [5] J. J. C. Jr, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Springer Science & Business Media, Abr. 2006, google-Books-ID: wBsRBwAAQBAJ.
- [6] Semtech, “LoraTM modulation basics,” Semtech, Application Note AN1200.22, May 2015, revision 2. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [7] LoRa-Alliance, “LorawanTM 1.1 specification,” LoRa Alliance, Specification, Oct 2017, versión 1.1. [En línea]. Disponible: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf
- [8] Semtech, “Datasheet sx1272/73,” Semtech, Datasheet, March 2017, versión 3.1. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272.pdf>
- [9] —, “Datasheet sx1276/77/78/79,” Semtech, Datasheet, August 2016, versión 5.0. [En línea]. Disponible: https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V5.pdf



- [10] Pycom, “Datasheet fipy,” Pycom, Datasheet, 2018, versión 1.0. [En línea]. Disponible: <https://docs.pycom.io/.gitbook/assets/fipy-specsheet-1.pdf>
- [11] —, “Datasheet lopy versión 1.0,” Pycom, Datasheet, 2018, versión 1.0. [En línea]. Disponible: <https://docs.pycom.io/.gitbook/assets/lopy-specsheet.pdf>
- [12] —, “Datasheet lopy versión 4.0,” Pycom, Datasheet, 2018, versión 1.0. [En línea]. Disponible: <https://docs.pycom.io/.gitbook/assets/lopy4-specsheet-1.pdf>
- [13] W. C. Y. Lee, “Estimate of local average power of a mobile radio signal,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 34, num. 1, pp. 22–27, Feb 1985.
- [14] I. A. V. P. Ing. P. Avila, Ing. F. Astudillo PhD, “Evaluación del rango de transmisión de lora para redes de sensores inalámbricas con lorawan en ambientes forestales,” Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, pablo.avila@ucuenca.ec, fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec, andres.vazquezr@ucuenca.edu.ec, 7 2017.
- [15] I. Rasool, A. Kemp, y N. Salman, “RSSI-based positioning in unknown path-loss model for WSN,” in *Sensor Signal Processing for Defence (SSPD 2012)*. London, UK: Institution of Engineering and Technology, 2012, pp. 25–25. [En línea]. Disponible: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic.2012.0112>
- [16] Arcotel, “Plan nacional de frecuencias,” Arcotel, Resolución, 2017. [En línea]. Disponible: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/01/Resoluci%C3%B3n-12-09-ARCOTEL-2017_completa_con-firmas-11.pdf
- [17] R. U. Mondal, “Radio frequency fingerprinting for outdoor user equipment localization,” *Jyväskylä studies in computing*, num. 271, 2017. [En línea]. Disponible: <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/56222>
- [18] E. G. M. y Rónier Sierra Dávila y Samuel Montejo Sánchez, “Aplicaciones y servicios basados en localización,” *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 3, num. 1, pp. 45–52, 2012. [En línea]. Disponible: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/74>
- [19] N. Bulusu, J. Heidemann, y D. Estrin, “Gps-less low-cost outdoor localization for very small devices,” *IEEE Personal Communications*, vol. 7, num. 5, pp. 28–34, Oct 2000.
- [20] A. Savvides, C.-C. Han, y M. B. Strivastava, “Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors,” in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '01*. Rome, Italy: ACM Press, 2001, pp. 166–179. [En línea]. Disponible: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=381677.381693>
- [21] S. Benaissa, D. Plets, E. Tanghe, J. Trough, L. Martens, L. Vandaele, L. Verloock, F. Tuytens, B. Sonck, y W. Joseph, “Internet of animals: characterisation of LoRa sub-GHz off-body wireless channel in dairy barns,” *Electronics Letters*, vol. 53, num. 18,



- pp. 1281–1283, Ago. 2017. [En línea]. Disponible: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2017.1344>
- [22] B. C. Fargas y M. N. Petersen, “GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs,” in *2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*. Geneva, Switzerland: IEEE, Jun. 2017, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8016251/>
- [23] A. M. Baharudin y W. Yan, “Long-range wireless sensor networks for geo-location tracking: Design and evaluation,” in *2016 International Electronics Symposium (IES)*. Denpasar, Indonesia: IEEE, Sep. 2016, pp. 76–80. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7860979/>
- [24] T. Sathyan, R. Shuttleworth, M. Hedley, y K. Davids, “Validity and reliability of a radio positioning system for tracking athletes in indoor and outdoor team sports,” *Behavior Research Methods*, vol. 44, num. 4, pp. 1108–1114, Dic. 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.springerlink.com/index/10.3758/s13428-012-0192-2>
- [25] D. Patel y M. Won, “Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things,” in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Sydney, NSW: IEEE, Jun. 2017, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8108501/>
- [26] J. J. Kang, I. Khodasevych, y S. Adibi, “A disaster recovery system for location identification-based low power wide area networks (LPWAN),” in *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*. Melbourne, VIC: IEEE, Nov. 2017, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8215359/>
- [27] Sujuan Liu, Chuyu Xia, y Zhenzhen Zhao, “A low-power real-time air quality monitoring system using LPWAN based on LoRa,” in *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. Hangzhou, China: IEEE, Oct. 2016, pp. 379–381. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7998927/>
- [28] “Sigfox.” [En línea]. Disponible: <https://www.sigfox.com/>
- [29] N. S. Knyazev, V. A. Chechetkin, y D. A. Letavin, “Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network,” in *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*. Kazan, Russia: IEEE, Jul. 2017, pp. 1–4. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7997528/>
- [30] O. Georgiou y U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, num. 2, pp. 162–165, Abr. 2017. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7803607/>



- [31] B. Oniga, V. Dadarlat, E. De Poorter, y A. Munteanu, "Analysis, design and implementation of secure LoRaWAN sensor networks," in *2017 13th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*. Cluj-Napoca: IEEE, Sep. 2017, pp. 421–428. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8117042/>
- [32] P. Neumann, J. Montavont, y T. Noel, "Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study," in *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. New York, NY: IEEE, Oct. 2016, pp. 1–8. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7763213/>
- [33] D. Sunehra, P. L. Priya, y A. Bano, "Children Location Monitoring on Google Maps Using GPS and GSM Technologies," in *2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*. Bhimavaram, India: IEEE, Feb. 2016, pp. 711–715. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7544926/>
- [34] M. E. P. Montiel, G. Pirela, y C. Rincón, "Geolocation Algorithm for mobile devices from issuers of WIFI," *revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento*, vol. 12, num. 1, p. 12, 2015.
- [35] L. Alliance, "Geolocation whitepaper," LoRa Alliance, Whitepaper, 2018.
- [36] "Cisco." [En línea]. Disponible: <https://www.cisco.com/>
- [37] "Semtech." [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/>
- [38] "Kerlink." [En línea]. Disponible: <https://www.kerlink.com/>
- [39] Guowei Shen, R. Zetik, y R. S. Thoma, "Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment," in *2008 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*. Hannover, Germany: IEEE, Mar. 2008, pp. 71–78. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4510359/>
- [40] A. F. García, C. Gómez, T. Sánchez, A. D. Redondo, L. Betancur, y R. C. Hincapié, "Algoritmos de Radiolocalización basados en ToA, TDoA y AoA Radiolocation Algorithms based on ToA, TDoA and AoA," *Ingeniería y Región*, vol. 14, p. 9, 02 2016.
- [41] Qi Yao, Seng-Kee Tan, Yu Ge, Boon-Sain Yeo, y Qinghe Yin, "An Area Localization Scheme for Large Wireless Sensor Networks," in *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, vol. 5. Stockholm, Sweden: IEEE, 2005, pp. 2835–2839. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1543864/>
- [42] Iswandi, H. T. Nastiti, I. E. Praditya, y I. W. Mustika, "Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based

- on Received Signal Strength Indicator (RSSI),” in *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*. Yogyakarta, Indonesia: IEEE, Oct. 2016, pp. 56–60. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7877347/>
- [43] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, y M. Pettissalo, “On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology,” in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. Copenhagen, Denmark: IEEE, Dic. 2015, pp. 55–59. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7377400/>
- [44] T. Rama Rao, D. Balachander, A. Nanda Kiran, y S. Oscar, “RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks,” in *2012 International Conference on Recent Trends in Information Technology*. Chennai, Tamil Nadu, India: IEEE, Abr. 2012, pp. 308–313. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6206765/>
- [45] J. D. Gibson, Ed., *The Mobile Communications Handbook*, 2da ed., ser. Electrical Engineering Handbook. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. [En línea]. Disponible: <https://www.springer.com/la/book/9783540648369>
- [46] “Lora alliance.” [En línea]. Disponible: <https://lora-alliance.org/>
- [47] T. Hadwen, V. Smallbon, Q. Zhang, y M. D’Souza, “Energy efficient LoRa GPS tracker for dementia patients,” in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Seogwipo: IEEE, Jul. 2017, pp. 771–774. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8036938/>
- [48] “Actility.” [En línea]. Disponible: <https://www.actility.com/>
- [49] N. Podevijn, D. Plets, J. Trogh, L. Martens, P. Suanet, K. Hendrikse, y W. Joseph, “TDoA-Based Outdoor Positioning with Tracking Algorithm in a Public LoRa Network,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 1–9, May 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/1864209/>
- [50] J. Wang, N. Tan, J. Luo, y S. J. Pan, “WOLoc: WiFi-only outdoor localization using crowdsensed hotspot labels,” in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*. Atlanta, GA, USA: IEEE, May 2017, pp. 1–9. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8057096/>
- [51] “dragino.” [En línea]. Disponible: <http://www.dragino.com/>
- [52] A. Joshi, I. Naga VishnuKanth, N. Samdaria, S. Bagla, y P. Ranjan, “GPS-less animal tracking system,” in *2008 Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks*. Indore, India: IEEE, Dic. 2008, pp. 120–125. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4772694/>



- [53] D. C. Rugeles, José de J. (Colombia) y León, “Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores,” in *CISCI*. Orlando, Florida: IIIS, Jul. 2013. [En línea]. Disponible: http://www.iiis.org/CDs2013/CD2013SCI/CISCI_2013/PapersPdf/CA150PJ.pdf
- [54] L. Qinghua, Y. Xiaozhen, G. Xingli, Z. Pengtai, L. Ping, S. Jia, y W. Chenxu, “Uncertainty analysis method for RSSI-based localization in three-dimensional wireless sensor network,” in *2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*. Yangzhou, China: IEEE, Oct. 2017, pp. 151–158. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8265745/>
- [55] A. Gholoobi y S. Stavrou, “A hybrid TDoA-ToA localization method,” in *ICT 2013*. Casablanca: IEEE, May 2013, pp. 1–4. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6632087/>
- [56] “pycom.” [En línea]. Disponible: <https://pycom.io/>
- [57] D. Capriglione, L. Ferrigno, E. D’Órazio, V. Paciello, y A. Pietrosanto, “Reliability analysis of RSSI for localization in small scale WSNs,” in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. Graz, Austria: IEEE, May 2012, pp. 935–940. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6229301/>
- [58] “espressif.” [En línea]. Disponible: <https://www.espressif.com/>
- [59] “National instruments.” [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/en-us.html>